



**HAL**  
open science

## Couplages et blocages en rhéologie du bois

Joseph Gril

► **To cite this version:**

Joseph Gril. Couplages et blocages en rhéologie du bois. Mécanique [physics.med-ph]. Université Montpellier 2 (Sciences et Techniques), 1997. tel-04864202

**HAL Id: tel-04864202**

**<https://hal.science/tel-04864202v1>**

Submitted on 4 Jan 2025

**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.

ACADEMIE DE MONTPELLIER  
UNIVERSITE MONTPELLIER 2  
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

# COUPLAGES ET BLOCAGES EN RHEOLOGIE DU BOIS

Joseph GRIL

Chargé de Recherche au CNRS  
Laboratoire de Mécanique et Génie Civil  
(UMR CNRS 5508)

*Dossier de synthèse*

Habilitation à diriger des recherches

Spécialité : MECANIQUE

Formation doctorale : Mécanique des matériaux, structures et génie des procédés

23 juillet 1997

JURY :

- |              |             |   |
|--------------|-------------|---|
| - M. Thierry | BRETHERAU   | Directeur de Recherche CNRS ( <i>Rapporteur</i> ) |
| - M. André   | CHRYSOCHOOS | Professeur  |
| - M. Daniel  | GUITARD     | Professeur ( <i>Rapporteur</i> )                  |
| - M. Georges | JERONIMIDIS | Professeur ( <i>Rapporteur</i> )                  |
| - M. Olivier | MAISONNEUVE | Professeur ( <i>Président</i> )                   |
| - M. Pierre  | MORLIER     | Professeur  |
| - M. Bernard | THIBAUT     | Directeur de Recherche CNRS                       |

## Remerciements

*Je remercie très sincèrement Messieurs les Professeurs Chrysochoos, Guitard, Jeronimidis, Maisonneuve et Morlier, ainsi que Messieurs les Directeurs de Recherche Bretheau et Thibaut, qui m'ont fait l'honneur de participer à ce jury.*

# TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION .....	4
I - BLOCAGES BIOMECANIQUES.....	8
I-1. GENESE DU BLOCAGE : LA MATURATION CELLULAIRE.....	8
I-1.1. De l'arbre à la tige .....	8
I-1.2. Formation du bois.....	9
I-2. MECANIQUE D'UNE TIGE EN CROISSANCE .....	11
I-2.1. Contraintes dans la section d'une tige en croissance.....	12
I-2.2. Simulation numérique des contraintes transverses.....	14
I-3. INTERPRETATION RHEOLOGIQUE DES BLOCAGES BIOMECANIQUES .....	17
I-3.1. De la tige au bois : le sens du temps.....	17
I-3.2. Viscoélasticité du bois et rhéologie de la maturation .....	19
CONCLUSION DE LA PARTIE I.....	22
II - DEBLOCAGE THERMOMECANIQUE .....	23
II-1. COMPORTEMENT THERMOMECANIQUE DU BOIS VERT .....	24
II-1.1. Activation thermique du comportement rhéologique.....	24
II-1.2. Analyse de la déformation thermique du bois vert .....	27
II-1.3. Décomposition de la recouvrance hygrothermique.....	30
II-1.4. Relation avec les conditions mécaniques de la maturation .....	31
II-2. DECOUPE ET FISSURATION.....	34
II-2.1. Découpe opérée dans un milieu élastique précontraint.....	35
II-2.2. Prise en compte de la fissuration.....	36
II-3. DEVELOPPEMENT D'UNE EXPERIMENTATION SUR DISQUES .....	37
II-3.1. Le cas isotrope transverse (modèle de Kübler) .....	38
II-3.2. La méthode de la fermeture.....	40
II-3.3. Relation avec la fissuration d'une rondelle .....	41
II-4. THERMOMECANIQUE D'UNE PORTION DE GRUME .....	43
II-4.1. La démarche du projet "billon" .....	44
II-4.2. Utilisation des bois ronds : traitement en bout des poteaux .....	45
II-4.3. Étuvage et séchage .....	47
CONCLUSION DE LA PARTIE II .....	49
III - COUPLAGES ET BLOCAGES DANS LE BOIS,.....	50
III-1. ECHELLES D'OBSERVATION ET PASSAGES MICRO-MACRO.....	51
III-1.1. Les passages micro-macro dans les bois.....	51
III-1.2. Anisotropie et passages micro-macro .....	55
III-1.3. L'eau dans le bois .....	56
III-2. LE COUPLAGE HYGROMECANIQUE.....	59
III-2.1. L'effet mécanosorptif.....	59
III-2.2. La décomposition de la déformation.....	60
III-2.3. L'approche des hygro-verrous .....	62
III-2.4. Caractérisations expérimentales.....	63
III-2.5. Interprétation microstructurelle de l'effet mécanosorptif .....	65
III-3. LE COMPORTEMENT EN CONDITIONS EXTREMES .....	67
III-3.1. Grandes déformations en compression et formage du bois .....	67
III-3.3. Le bois modifié .....	71
III-3.4. Rhéologie à haute température.....	73
CONCLUSION DE LA PARTIE III .....	74
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....	75
<i>Viscoélasticité des contraintes de croissance et recouvrance hygrothermique.....</i>	<i>75</i>
<i>Les suites du projet "billon".....</i>	<i>76</i>
<i>Le couplage hygrothermomécanique.....</i>	<i>78</i>
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	80

## INTRODUCTION

L'application au bois des principes généraux de la mécanique des solides (ou "rhéologie" dans le sens assez large que ce terme possède en France) nécessite comme pour tout matériau une connaissance préalable de ses conditions d'élaboration, de l'étendue et l'origine de sa variabilité, de ses propriétés physiques et chimiques, de sa microstructure. Où trouver ce type d'information, analogue par exemple à celle que peuvent fournir les métallurgistes ou les polyméristes pour leurs matériaux respectifs ? Cette "science du bois" existe bien, mais sous une forme moins structurée, moins développée et moins autonome. Il est de ce fait fréquent qu'un rhéologue abordant le bois soit conduit à consacrer tant d'efforts à la compréhension de son matériau d'étude qu'en fin de compte il fait lui-même de la science du bois. Cette logique a sous-tendu l'évolution du présent thème de recherche, situé à l'intersection de la science du bois et de la mécanique des solides.

La thèse conduite au Laboratoire de Mécanique des Solides de l'École Polytechnique de 1984 à 1988 concernait l'étude expérimentale et la modélisation du couplage mécanosorptif, c'est-à-dire l'interaction entre les phénomènes de sorption et le comportement mécanique du bois. Parti d'une approche inspirée des modèles d'Ingo MÜLLER sur les alliages à mémoire de forme, le sujet a progressivement évolué vers un point de vue plus proche du matériau à la faveur de longs séjours à l'Institut de Recherche sur le Bois de l'Université de Kyoto. Nous reviendrons dans la troisième partie de ce mémoire sur les approches "micro-macro" et l'étude de la stabilisation dimensionnelle développées alors avec Misato NORIMOTO, ainsi que les travaux sur l'effet mécanosorptif qui doivent beaucoup à David HUNT de l'Université South Bank, Londres.

Ce travail laissait de nombreuses questions sans réponse, en particulier une interrogation sur l'incidence de la genèse du matériau sur son comportement rhéologique. Avant d'être manipulé par l'homme qui le débite, le sèche et le traite, le bois subit dans l'arbre, depuis l'instant de sa formation et jusqu'à l'abattage, toute une série d'actions biochimiques et mécaniques qui détermineront ses propriétés futures. L'intégration en 1989 de l'équipe "Mécanique et usinage du bois" du LMGC (LMGMC à l'époque) suscitait, par le voisinage de biologistes, de nouveaux sujets d'étude visant à élucider le lien entre les conditions d'élaboration et le comportement mécanique.

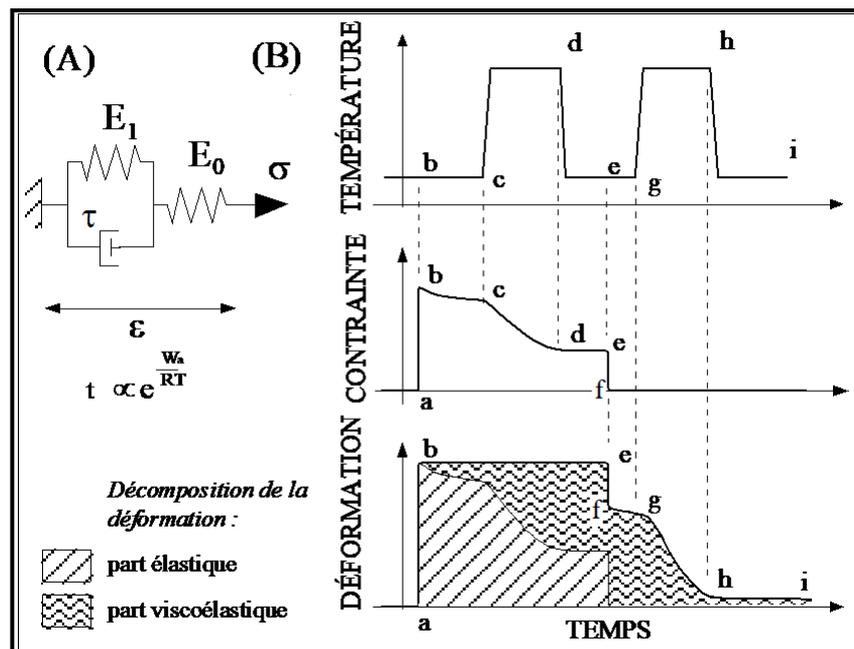
La première partie sera consacrée à ces travaux réalisés dans le cadre du projet "Architecture, structure et mécanique de l'Arbre" (1989-1992) développé à Montpellier sous l'impulsion de Bernard THIBAUT, et réunissant les compétences de plusieurs disciplines pour comprendre le processus d'élaboration du bois en relation avec le développement de l'arbre. La seconde rendra compte de travaux liés au projet "billon" (1992-1996) visant à rassembler toutes les données et modules informatiques nécessaires à la simulation du comportement mécanique d'un billon de bois vert.

On voit qu'en terminant par l'étude du comportement du bois dans la troisième partie nous rétablissons l'ordre imposé par le matériau, qui commence par être produit dans l'arbre avant d'être débité à l'état vert puis transformé pour devenir en dernier lieu un matériau d'usage. D'autre part, cette dernière partie ne fera pas seulement référence aux premiers travaux, mais

aussi à des résultats de recherches récentes menées en parallèle avec les autres et qui débouchent sur des perspectives importantes, concrétisées par le démarrage récent de projets inter-équipes financés par la DERF (Direction de l'Espace Rural et de la Forêt).

Il nous faut maintenant justifier l'emploi des termes utilisés pour désigner le fil conducteur de toutes ces recherches. Un "couplage" signifie, d'après le Petit Robert, l'interaction entre deux phénomènes physiques : le "blocage" est le fait d'empêcher de se mouvoir. Transposé au contexte de la rhéologie, le couplage devient l'interaction entre des sollicitations mécaniques et d'autres phénomènes, et le blocage la fixation de la déformation. Le lien entre ces deux concepts tient au fait que les *couplages* ou interactions entre phénomènes physiques, sont souvent à l'origine du *blocage* ou immobilisation, de l'un des phénomènes par l'autre. Lorsque l'objet de l'étude est le comportement mécanique d'un matériau, il faut donc rechercher la responsabilité du blocage de composantes de la déformation dans l'action d'un phénomène physique d'une autre nature. Par ailleurs, les blocages sont rarement définitifs : qui dit blocage dit possibilité de *déblocage*, l'agent de ce déblocage pouvant d'ailleurs être aussi un phénomène de couplage.

Ces notions exprimées volontairement dans des termes non techniques peuvent être précisées en utilisant le langage de la viscoélasticité. Considérons le cas d'un matériau viscoélastique solide, dont le comportement mécanique est donné par la représentation analogique de la figure 0-1, soumis à un essai de relaxation (déformation imposée constante) suivi de recouvrance (annulation de la contrainte), avec à chaque étape une action thermique augmentant fortement la mobilité moléculaire. La figure montre les évolutions des paramètres descriptifs de cet essai, température, contrainte et déformation. A la mise en charge (ab) le matériau réagit instantanément, puis la déformation étant maintenue constante (bc) se produit une relaxation



**Fig. 0-1 : Interprétation viscoélastique des notions de blocage et de déblocage**

(A) Représentation du comportement (modèle de Zener) avec activation thermique par une loi d'Arrhénius. (B) Simulation d'un essai de relaxation + recouvrance avec thermoactivation : ab : mise en charge ; bcde : déformation imposée (relaxation de la contrainte) ; cd : stimulation thermique de la relaxation ; ef : décharge et recouvrance instantanée ; fghi : recouvrance différée ; gh : stimulation thermique de la recouvrance.

de la contrainte, modérée tout d'abord (bc) puis activée par l'élévation de température (cd). Cette relaxation va de pair avec une redistribution de la déformation : la part élastique diminue tandis que la part visqueuse augmente.

Le refroidissement sous charge (de) permet le blocage de la déformation viscoélastique. Ainsi, la décharge (ef) appliquée au matériau refroidi n'entraîne qu'une faible recouvrance, qu'elle soit instantanée (ef) ou différée (fg). Il subsiste une déformation permanente importante que nous considérons comme "bloquée" pour signifier que dans des conditions normales d'utilisation (la température ambiante dans cet exemple), sa recouvrance ne peut être observée dans des temps raisonnables. Pour l'observer il est nécessaire de sortir des conditions normales d'utilisation, par exemple au moyen d'une nouvelle élévation de température (gh). Avec le modèle envisagé, la recouvrance finale après refroidissement (hi) est quasiment totale.

On peut dire que le cycle thermique, responsable du blocage pendant la charge, a permis aussi le déblocage après décharge. Blocages et déblocages s'expliquent ici simplement par l'action de la température sur la mobilité moléculaire d'où résulte diminution ou augmentation des temps caractéristiques des processus visqueux, ce que l'on peut considérer comme un aspect de couplage thermomécanique.

D'une manière plus générale, nous appelons "blocage" l'apparition d'une déformation viscoélastique bloquée mais susceptible d'être déblocuée ultérieurement. Comme cela a été illustré par l'exemple ci-dessus, la décomposition de la déformation sur laquelle nous avons basé nos définitions est imprécise, puisqu'entièrement dépendante des fenêtres expérimentales considérées. La frontière entre déformation instantanée et différée dépend dans la pratique de la vitesse de chargement, tandis que la proportion de déformation bloquée dépend du moment choisi pour activer thermiquement la recouvrance. Mais son caractère flou n'enlève rien à la pertinence pratique du concept de blocage, dont nous verrons qu'il s'applique remarquablement à plusieurs des couplages suscités par la rhéologie du bois.

Un bel exemple de "blocage et déblocage par couplage" nous est fourni par la *flèche de Cupidon* [Inoue et al. (1992)], constituée de deux parties imbriquées (figure 0-2) : d'une part une sculpture de flèche en bois taillée dans le sens des fibres et plus épaisse aux deux extrémités figurant la pointe et l'empennage ; de l'autre un cœur percé, taillé dans un autre bois, dans

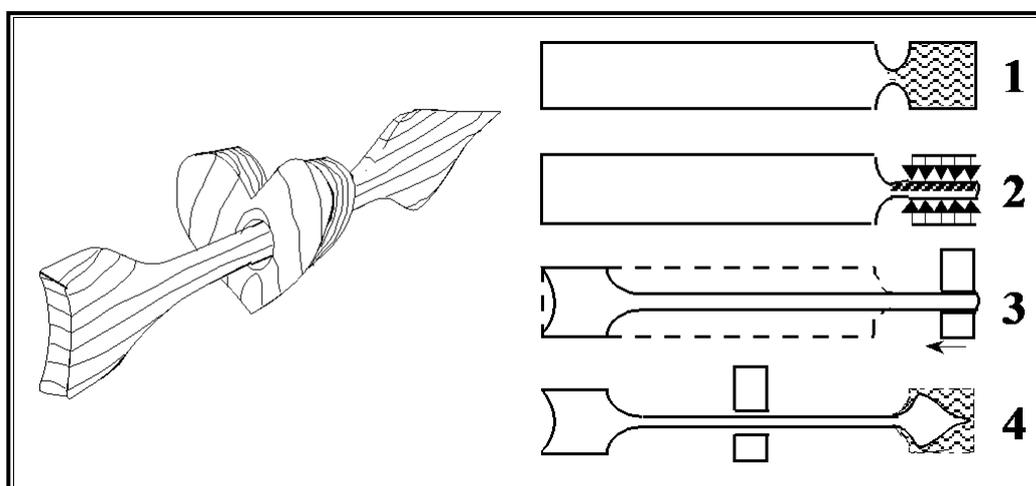
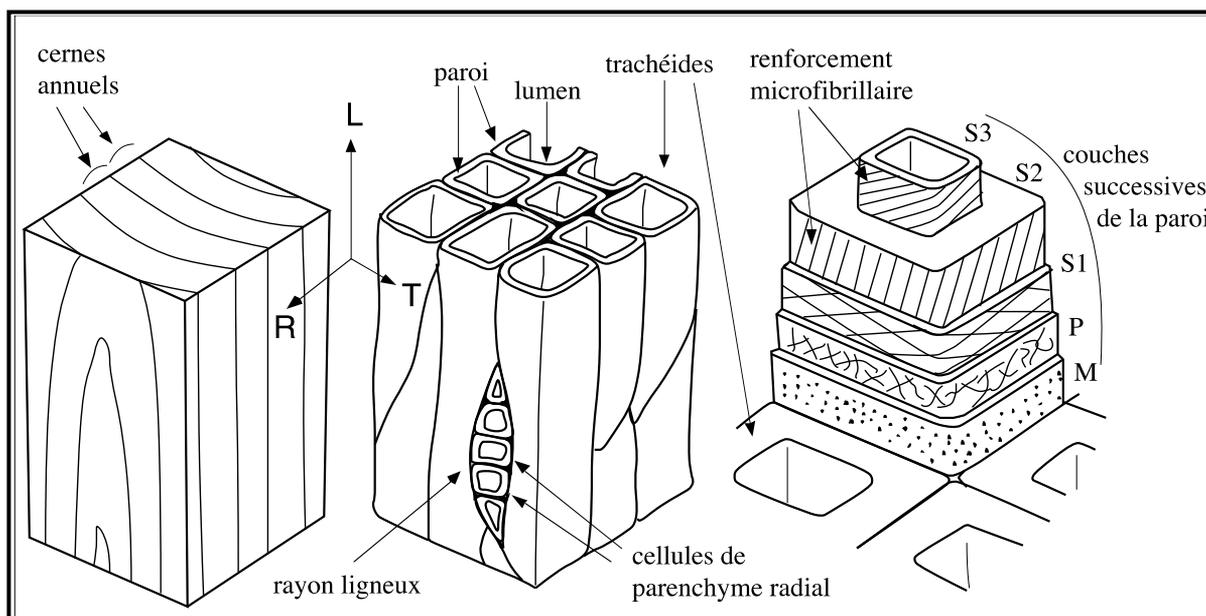


Fig. 0-2 : La flèche de Cupidon

lequel coulisse l'axe de la flèche. Comment la flèche est-elle passée dans le trou ? La réponse est donnée sur la figure. On a distingué quatre étapes :

- (1) On ramollit l'extrémité d'une planche épaisse par une action "hygrothermique", consistant à chauffer le bois préalablement humidifié.
- (2) On comprime cette extrémité jusqu'au compactage quasi total de la structure cellulaire du bois. Dans le cas d'un bois de faible densité on peut ainsi obtenir des taux de compression considérables.
- (3) Le "blocage" a été obtenu en laissant refroidir puis sécher l'extrémité maintenue comprimée. Ici intervient le couplage dit "mécanosorptif" entre l'action mécanique et la désorption, source de forte mobilité moléculaire. Une fois le bois séché, l'annulation de la petite contrainte restante n'a entraîné qu'une recouvrance négligeable.
- (4) Après que le cœur est passé par l'extrémité densifiée et le corps aminci de la flèche, l'extrémité est de nouveau humidifiée et chauffée. Cela entraîne le "déblocage" ou recouvrance quasi totale de la déformation mécanosorptive bloquée

Nous verrons dans la troisième partie que ces quatre étapes, qui caractérisent tout formage du bois, s'expliquent en faisant référence à plusieurs échelles de la microstructure du bois. Pour finir cette brève introduction, rappelons qu'en effet le bois est tout à la fois : un milieu curviligne à l'échelle de la tige ou d'une poutre, un multicouche orthotrope à l'échelle macroscopique, un matériau cellulaire à l'échelle du microscope, un multicouche encore à l'échelle pariétale, un composite à fibres au niveau de la matière des couches de la paroi, un polymère semi cristallin à l'échelle macromoléculaire. Ainsi la figure 0-3 rappelle, dans le cas relativement simple d'un résineux, comment ces différents niveaux structurels concourent à produire la formidable anisotropie macroscopique du bois.



**Fig. 0-3 : Quelques échelles d'observation d'un résineux, d'après Norimoto et Gril (1989)**

(Gauche) volume élémentaire représentatif du bois matériau, contenant un nombre suffisant de cernes annuels et assez éloigné de la moelle pour que l'on puisse négliger leur courbure. (Centre) : échelle microscopique faisant apparaître la structure en nid d'abeille. (Droite) Ultrastructure pariétale montrant la structure multicouche d'une paroi cellulaire, chaque sous-couche étant caractérisé par des renforcements de cellulose cristalline orientés différemment.

## Première partie

# BLOCAGES BIOMECHANIQUES DANS L'ARBRE

Le thème du couplage biomécanique a mûri au sein du programme “Architecture, Structure et Mécanique de l'Arbre” (ASMA) coordonné par Bernard Thibaut de 1989 à 1992 à Montpellier et poursuivi par l'organisation d'un séminaire annuel jusqu'en 1996. L'idée d'ASMA était de réunir les compétences de plusieurs disciplines, Botanique, Anatomie et Mécanique des solides, pour aborder l'étude du fonctionnement de l'arbre “usine à bois”. L'un des succès de ce programme pluridisciplinaire a été de forger, au sein des participants, un langage et un bagage conceptuel communs, au point qu'à la fin chacun était capable de suivre, voire dans une certaine mesure de présenter les travaux de ses collègues d'une autre discipline. Par la suite, Mériem FOURNIER (au LRBB puis au CIRAD Forêt et à l'ENGREF Montpellier) l'a fait évoluer vers une approche plus générale de la biomécanique végétale [Fournier (1994)]. Cela s'est traduit par l'organisation à Montpellier, en septembre 1994, d'un Colloque pluridisciplinaire du Comité National de la recherche scientifique intitulé “Biomécanique des végétaux” [Thibaut (1994)]. Le succès de ce colloque a suscité l'organisation d'un second prévu à Reading, G.B., en septembre 1997.

Notre contribution à ces travaux se situe au niveau de la prise en compte du comportement rhéologique du bois, en particulier de sa nature viscoélastique.

## I-1. GENESE DU BLOCAGE : LA MATURATION CELLULAIRE

### I-1.1. DE L'ARBRE A LA TIGE

La croissance des plantes est basée sur le développement spatial de “tissus générateurs”. Le premier de ces tissus est contenu dans le germe de la *graine*. Il produit, à la germination, deux *bourgeons* destinés à générer l'un la partie aérienne, l'autre les racines. Les bourgeons se “déplacent” en laissant derrière eux la moelle d'une future tige et, par endroits se divisent pour permettre des ramifications. Ils constituent les tissus générateurs primaires. A la périphérie de la moelle se fabrique, issu du bourgeon, un tissu générateur secondaire appelé *cambium* qui sera à l'origine de la production de bois vers l'intérieur et d'écorce vers l'extérieur. Enfin un autre tissu pourra être à l'origine de la production de liège sur le pourtour de l'écorce.

Le développement dans le temps et l'espace des bourgeons et des tiges répond à des schémas bien connus des botanistes [Hallé et Oldeman (1970)]. La simulation de la croissance d'un arbre est possible à partir du moment où, pour l'essence considérée, ont été identifiées les lois régissant l'apparition et la disparition des portions de tiges ou axes. Toutefois cette information

ne permet d'accéder qu'à la "topologie" de la structure ramifiée, c'est-à-dire la description de sa croissance primaire [Blaise (1995)]. Pour accéder à l'actualisation géométrique il est nécessaire de connaître aussi les lois d'épaississement des tiges ou croissance secondaire, permise par l'existence permanente du cambium sur leur pourtour, et de faire intervenir des concepts de mécanique.

Sauf de très rares exceptions, la structure aérienne est parfaitement ramifiée, c'est-à-dire que chaque portion d'axe est issue d'un unique parent. De plus, le chargement auquel elle est soumise est essentiellement lié à la gravité. Il est alors possible de formuler simplement le problème mécanique associé à chaque étape de croissance d'un arbre, pendant laquelle s'est produite une variation du nombre de tiges, de leur masse et de leur position [Dabadie (1991)]. Dans Gril et al. (1992) nous avons montré comment le problème peut être abordé dans le cadre d'une théorie des milieux curvilignes élastiques, à partir du moment où l'on dispose d'une numérotation des tiges respectant leur ordre d'apparition, et d'une description associée de leurs caractéristiques géométriques et mécaniques. La méthode proposée consiste à obtenir à chaque étape de la croissance la nouvelle répartition dans l'espace des tiges, par approximations successives et au moyen d'un double parcours de l'arbre :

- calcul par récurrence des charges portées par chaque portion de tige en allant de l'extrémité des axes (feuilles, fruits) vers l'insertion au sol (collet) ;
- réactualisation de la géométrie en parcourant les axes du sol aux extrémités.

La publication de ces idées lors d'un séminaire du groupe "Architecture, Structure et Mécanique de l'Arbre" en 1992 visait à promouvoir la collaboration des mécaniciens du bois avec le Laboratoire de Modélisation du CIRAD spécialisé dans la simulation de la croissance des arbres. Cette démarche a eu le résultat escompté puisque peu après démarrait la thèse de Thierry Fourcaud au LRBB [Fourcaud (1995)] dont le travail se poursuit au LRBB dans le cadre d'une collaboration entre l'INRA et le Laboratoire de Modélisation du CIRAD.

Tout cela suppose une connaissance de la réaction de chaque portion de tige aux efforts qu'elle subit à chaque étape de sa croissance en épaisseur. Or, cette croissance de la tige est aussi la formation de notre matériau : les efforts supportés par la tige sont aussi des contraintes mécaniques qui s'exercent sur le bois, et sont à l'origine de blocages biomécaniques qui caractérisent son état initial.

### **I-1.2. FORMATION DU BOIS**

Le bois est fabriqué à partir du *cambium*, tissu actif ou "générateur", situé sur tout le pourtour des tiges. La figure I-1 montre une représentation schématique de coupes transverses de part et d'autre du cambium. Immédiatement à droite des cellules de cambium reconnaissables à leur noyau, se trouvent les dernières nées des cellules de bois, caractérisées par une mince paroi primaire. Un peu plus vers la droite, se trouvent les cellules plus âgées et épaissies par dépôt d'une paroi secondaire. On retrouve ainsi, à l'échelle de la vie d'une cellule, le rythme d'une croissance primaire consistant en une occupation de l'espace, suivie d'une croissance secondaire avec renforcement des positions acquises.

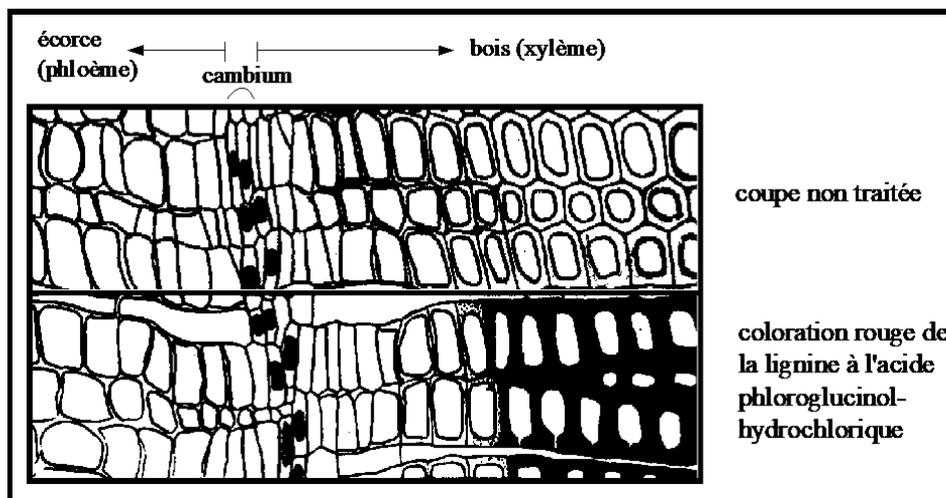


fig. I-1 : Schéma de coupes transverses près du cambium d'après Freudenberg (1964)

Les cellules de cambium se reconnaissent à leur noyau, à leur gauche se trouvent les cellules d'écorce et à leur droite les cellules de bois. Elles sont d'autant plus âgées et leur paroi d'autant plus épaisse qu'elles sont plus éloignées de leur "cousine" cambiale. La coupe du haut est non traitée ; sur celle du bas la coloration utilisée met en évidence la lignine.

Ces schémas mettent aussi en évidence un décalage temporel entre la mise en place de la paroi secondaire et sa lignification. Ce décalage se traduit, au niveau de la structure interne de la paroi, par le fait que les couches les plus externes et constituées en premier contiendront plus de lignine que les autres.

On appelle *maturation* la phase finale de la formation de la cellule. On peut considérer qu'elle commence une fois que s'est constitué la paroi secondaire et que démarre la lignification de la paroi primaire, et s'achève avec la lignification complète de la paroi et la mort de la cellule. Il y aurait donc un lien étroit entre lignification et maturation, bien qu'il ne soit pas prouvé que tous les phénomènes liés à la maturation soient causés par la lignification. Cette maturation est à l'origine du couplage biomécanique, c'est-à-dire l'interaction entre le processus biochimique de la formation de la matière et le comportement mécanique du matériau qui en résulte.

Des observations effectuées sur le comportement du bois récemment formé, c'est-à-dire à proximité du cambium, ont permis de mettre en évidence un phénomène de déformation induite par la maturation. Dans le cas le plus habituel (bois normal) les cellules tendent à se raccourcir axialement et à gonfler transversalement. L'intensité du raccourcissement axial dépend principalement de l'angle des microfibrilles (AMF) par rapport à l'axe de la cellule : il est d'autant plus grand que l'AMF moyen est faible. Ce mouvement empêché par les cellules voisines aboutit à une mise en traction longitudinale et une compression tangentielle de la nouvelle cellule. Des morphologies cellulaires particulières sont généralement associées aux deux cas extrêmes possibles : AMF quasiment nul et fort raccourcissement axial dans le bois de tension des feuillus ; AMF élevé (jusqu'à 45°) et allongement axial dans le bois de compression des résineux.

Si l'existence de la déformation de maturation et sa relation avec l'AMM sont des faits certains, la compréhension du mécanisme par lequel elle est générée au niveau de la paroi cellulaire fait

encore défaut même si le sujet a pu susciter quelques débats passionnés. Voici ce que pourrait être, selon nous, la succession d'événements aboutissant à la formation d'une paroi cellulaire telle que celle illustrée sur la figure 0-3 :

- Durant leur croissance primaire les cellules luttent pour l'occupation de l'espace entre l'ancien bois et le cambium. La pression de turgescence joue un rôle important à ce stade. Quand cette phase est achevée, elles ont acquis leur dimension quasi définitive et leur paroi primaire (P) est constituée.
- Les premières couches de microfibrilles cellulosiques (enrobées d'hémicellulose) se déposent contre la paroi primaire de manière à rapidement fixer le diamètre atteint : c'est la couche S1 dont les microfibrilles ont une orientation presque transversale à l'axe de la fibre. A peu près en même temps débute, au niveau de la lamelle mitoyenne (M) et de la paroi primaire (P), la lignification qui contribuera elle aussi à fixer le contour extérieur de la cellule.
- La couche S2 de la paroi secondaire se constitue par dépôt concentrique de couches cellulosiques avec des microfibrilles généralement peu inclinées par rapport à l'axe de la fibre. Cet *angle moyen des microfibrilles* (AMM) dans la couche S2 est un paramètre structurel de première importance.
- La lignification de la paroi secondaire s'effectue en commençant par les couches les plus externes et en progressant vers l'intérieur de la cellule. On pourrait émettre à ce niveau une hypothèse sur le rôle de la pression de turgescence, selon laquelle les cycles de pression journaliers stimuleraient un double mouvement de diffusion : les monomères précurseurs de lignine diffuseraient à partir du cytoplasme vers les couches externes tandis que l'eau excédentaire à la suite de la polymérisation serait évacuée de la paroi [Terashima, 1990 #225].
- La condensation de la structure moléculaire résultant de la polymérisation, jointe au départ d'eau et à l'effet de la pression de turgescence, aboutirait à "plaquer" chaque nouvelle couche sur les anciennes (le terme de "condensation" étant pris dans le sens donné par le Petit Larousse de : assemblage de plusieurs molécules chimiques, avec élimination de molécules simples telles que l'eau). Ce processus pourrait suffire à expliquer la tendance de la cellule nouvellement formée à gonfler transversalement.
- Compte-tenu des efforts mis en jeu dans le raccourcissement axial, bien supérieurs à ce que peut produire la pression de turgescence, il faut invoquer pour l'expliquer l'intervention d'un second mécanisme actif. On peut imaginer celui-ci totalement indépendant du premier comme dans l'hypothèse de "cristallisation de la cellulose" formulée par Bamber (1978). On peut aussi concevoir une relation de stimulation entre les deux mécanismes en disant par exemple que le rapprochement des microfibrilles résultant de la lignification entraîne la formation de liaisons latérales entre elles, d'où une tendance au raccourcissement du réseau des microfibrilles. On retrouve ainsi certains aspects du mécanisme proposé par Boyd (1972).

La déformation de maturation est empêchée pour la plus grande part par la présence de cellules voisines, en particulier dans le plan tangentiel TL parallèle au cambium. Ainsi le nouveau bois subit, durant sa formation, une contrainte de compression T et de traction L. Cette *contrainte de maturation* devient de la compression dans le bois de compression et une traction plus forte dans le bois de tension, d'où ces deux appellations. Elle s'identifie, à la fin de la maturation de cette couche de bois, à la *contrainte initiale de croissance*. Par la suite, la *contrainte de croissance* est modifiée par l'effet cumulé de la maturation des nouvelles couches de bois et de la variation des masses supportées par la tige.

La contrainte de croissance joue un rôle essentiel dans la tenue mécanique d'une tige, pour deux raisons principales : d'une part elle crée une précontrainte périphérique favorable à la flexibilité puisqu'elle diminue le risque de flambement longitudinal et de défibrage transversal, d'autre part elle permet le contrôle de l'orientation par le jeu d'efforts axiaux dissymétriques.

## I-2. MECANIQUE D'UNE TIGE EN CROISSANCE

Connaissant le mécanisme de création de matière et de maturation à l'origine de la mise sous contrainte initiale du bois, on dispose de l'information donnant la réaction d'une portion de tige aux efforts subis. Le cadre théorique utilisé pour décrire le comportement de cette portion de tige sera :

- soit celui des milieux curvilignes rigides lorsqu'il s'agira de ne représenter que les effets longitudinaux ;
- soit celui des déformations planes généralisées (combinaison de déformations planes et théorie de milieu curviligne) pour inclure l'étude des contraintes transverses.

Dans ce chapitre nous allons envisager le couplage entre le phénomène de croissance, c'est-à-dire le dépôt progressif de couches de bois, et les actions mécaniques supportées par la tige. L'effet de la maturation, selon ce point de vue, se limite à la mise sous contrainte initiale du bois récemment formé. Dans le chapitre suivant nous aborderons le couplage biomécanique durant la phase de maturation elle-même, et les blocages qui en résultent.

### I-2.1. CONTRAINTES DANS LA SECTION D'UNE TIGE EN CROISSANCE

Imaginons le cas fictif d'un arbre "bidimensionnel" qui nous suffira pour illustrer les principaux phénomènes. La portion de tige est assimilée à une poutre 2D, dont la section droite est paramétrée par la coordonnée ( $y$ ) variant entre  $-y_1(t)$  et  $y_2(t)$ , et soumise à l'effort normal  $N$  et au moment de flexion  $M$ . L'équilibre statique avec les efforts intérieurs s'écrit :

$$N = \int_{-y_1}^{y_2} \sigma(y) dy \quad ; \quad M = \int_{-y_1}^{y_2} \sigma(y)y dy$$

où  $\sigma(y)$  désigne la contrainte longitudinale à la position  $y$ .

Supposons connu l'état de la portion de tige à l'instant  $t$ , et cherchons quelle modification se sera produite à l'instant  $t+\delta t$ , la tige ayant légèrement grossi de  $\delta y_1$  et  $\delta y_2$  (figure I-2), et le chargement ayant légèrement augmenté de  $\delta N$  et  $\delta M$  on aurait :

$$dN = \int_{-y_1}^{y_2} d\sigma(y)dy + \hat{S}_1 dy_1 + \hat{S}_2 dy_2 \quad ; \quad dM = \int_{-y_1}^{y_2} d\sigma(y)y dy + \hat{S}_1 y_1 dy_1 - \hat{S}_2 y_2 dy_2 \quad (1)$$

où les termes d'intégration correspondent à la réaction de l'ancien bois et les suivants à l'action mécanique du bois nouvellement formé,  $\hat{S}_1$  (resp.  $\hat{S}_2$ ) représentant la *contrainte initiale de croissance* supposée constante pour tout le bois qui vient d'être formé entre  $y_1$  et  $y_1+\delta y_1$  (resp.  $y_2$  et  $y_2+\delta y_2$ ).

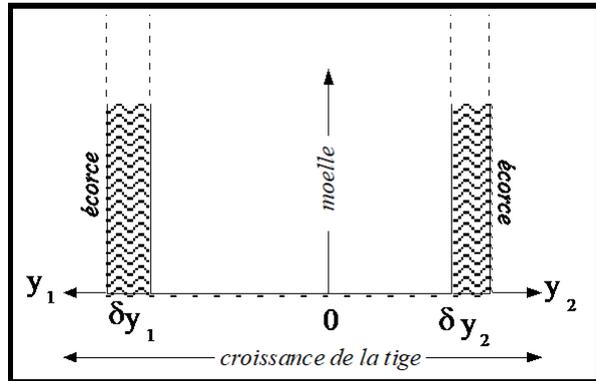


Fig. I-2 **Incrément de croissance d'une portion de tige (calcul plan)**

Par ailleurs, il convient d'appliquer l'hypothèse cinématique des milieux curvilignes, selon laquelle *toute section droite reste section droite*. Si  $\delta\varepsilon(y)$  désigne l'incrément de déformation en toute position  $y$ , cela se traduit par l'équation :

$$\delta\varepsilon(y) = \delta\alpha + y \delta\beta \quad (2)$$

où  $\delta\alpha$  est la variation relative de longueur de la moelle et  $\delta\beta$  la variation de sa courbure. Pour déterminer  $\delta\alpha$  et  $\delta\beta$  il est nécessaire de faire intervenir des informations sur le comportement. Si l'on suppose que *l'ancien bois se comporte élastiquement*, appelant  $E(y)$  le module d'Young en  $y$ , on écrit :

$$\delta\sigma(y) = E(y) \delta\varepsilon(y) \quad (3)$$

En combinant (1), (2) et (3), on aboutit à un système permettant de calculer les inconnues  $\delta\alpha$  et  $\delta\beta$  :

$$\begin{bmatrix} dN \\ dM \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{NN} & Q_{NM} \\ Q_{NM} & Q_{MM} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} da \\ db \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{N} \\ \hat{M} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} da \\ db \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{NN} & Q_{NM} \\ Q_{NM} & Q_{MM} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} dN - \hat{N} \\ dM - \hat{M} \end{bmatrix} \quad (4)$$

où :

- les  $Q_{ab}$  sont des rigidités globales,  $Q_{NN}$  la rigidité de traction-compression,  $Q_{MM}$  la rigidité de flexion et  $Q_{NM}$  un terme de couplage provenant de la dissymétrie de la croissance.:

$$Q_{NN} = \int_{-y_1}^{y_2} E(y) dy \quad ; \quad Q_{NM} = \int_{-y_1}^{y_2} E(y) y dy \quad ; \quad Q_{MM} = \int_{-y_1}^{y_2} E(y) y^2 dy \quad (5)$$

-  $\hat{N}$  et  $\hat{M}$  représentent la réaction active de la tige en terme d'effort normal et de flexion, respectivement, du fait de la maturation :

$$\hat{N} = \hat{S}_1 dy_1 + \hat{S}_2 dy_2 \quad ; \quad \hat{M} = \hat{S}_1 y_1 dy_1 - \hat{S}_2 y_2 dy_2 \quad (6)$$

L'expression (4) met en évidence les deux phénomènes qui concourent à la mise en place de la contrainte de croissance, support des charges et maturation cellulaire. Dans le cadre linéaire élastique présenté ici, on pourrait en effet calculer séparément le champ de contrainte qui résulterait des charges seules (termes  $\delta N$  et  $\delta M$ ) [Fournier et al. (1991a)] et celui qui résulterait du phénomène de maturation seul (termes  $\hat{N}$  et  $\hat{M}$ ) [Fournier et al. (1991b)]. Dans la réalité où interviennent des non linéarités comportementales et géométriques, ces deux effets sont en fait indissociables.

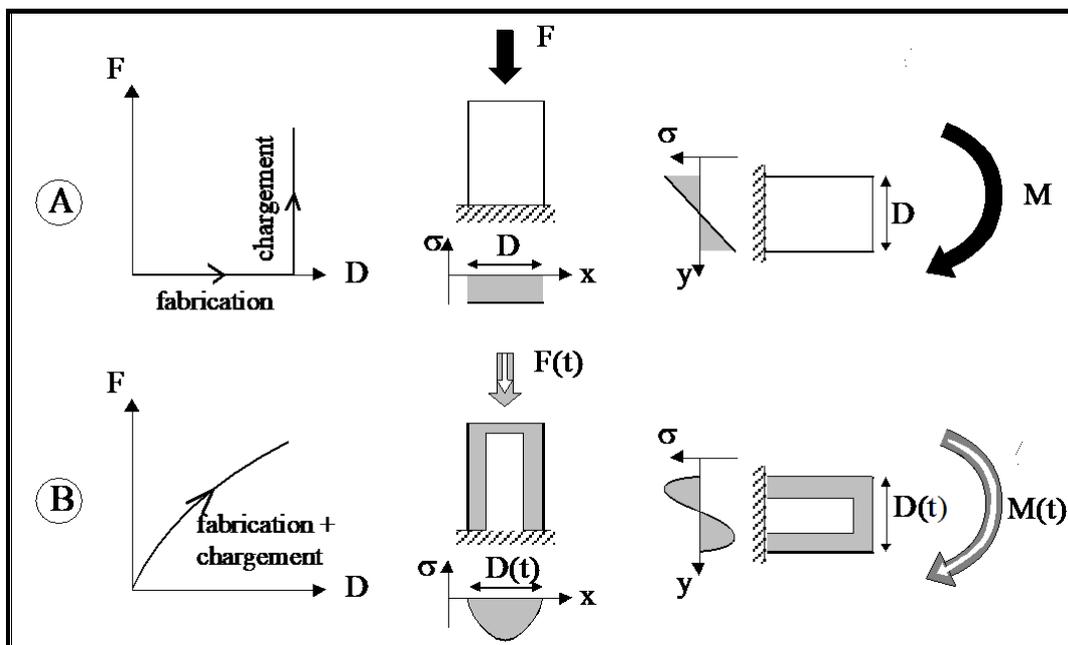
La seconde expression (6) souligne bien les deux moyens fondamentaux dont la tige dispose pour contrôler son orientation au travers du moment induit par la maturation : soit il y a croissance excentrée avec production de bois homogène ( $y_1 \neq y_2$  et  $\hat{S}_1 = \hat{S}_2$ ), soit il n'y a pas d'excentricité géométrique mais la nature du bois formé diffère sur chacun des côtés de la tige ( $y_1 = y_2$  et  $\hat{S}_1 \neq \hat{S}_2$ ). Dans la réalité on observe une combinaison de ces deux stratégies : la production de bois de réaction (de tension ou de compression) est souvent associée à de la croissance excentrique.

Connaissant les grandeurs globales  $\delta\alpha$  et  $\delta\beta$  correspondant à la variation de forme de la tige au niveau de la moelle, on peut remonter aux incréments de contrainte locale  $\delta\sigma$  par (3) et (2). En divisant par  $\delta t$  toutes les quantités incrémentales obtenues et en faisant tendre  $\delta t$  vers 0, on obtient les dérivées  $d\alpha/dt$ ,  $d\beta/dt$  et la dérivée partielle  $\partial\sigma/\partial t$ , d'où l'on tire par intégration :

$$a = a_0 + \int_0^t \frac{da}{dt} dt \quad ; \quad b = b_0 + \int_0^t \frac{db}{dt} dt \quad ; \quad s(y, t) = \hat{S}(y) + \int_{\tau(y)}^t \frac{\partial s}{\partial t} dt \quad (7)$$

où le temps  $t=0$  est compté à partir de la formation de la moelle correspondant à la portion de tige considérée (à  $t=0$ , on a  $y_1=y_2=0$ ) ;  $\alpha_0$  et  $\beta_0$  représentent une déformation initiale de la moelle, lorsque débute la croissance secondaire de la tige, par rapport à la forme qu'elle avait à sa mise en place ;  $\tau(y)$  est le temps de formation du bois à la position  $y$  et  $\hat{S}(y)$  la contrainte initiale de croissance subie par le bois situé en  $y$  après sa formation.

Nous avons traité un problème incrémental, cela est inévitable lorsque la structure se constitue en même temps qu'elle est chargée. En cela, la mécanique des tiges se distingue de la résistance des matériaux conventionnelle, où les poutres sont d'abord fabriquées, puis chargées [Fournier et al. (1991a)]. Cette spécificité est apparente dans la dernière des équations (7) où l'on a pris soin de ne calculer la contrainte subie par le matériau qu'à partir du moment où il existe (figure I-3).



**Fig. I-3 : Mécanique des tiges et résistance des matériaux : la contrainte de support**

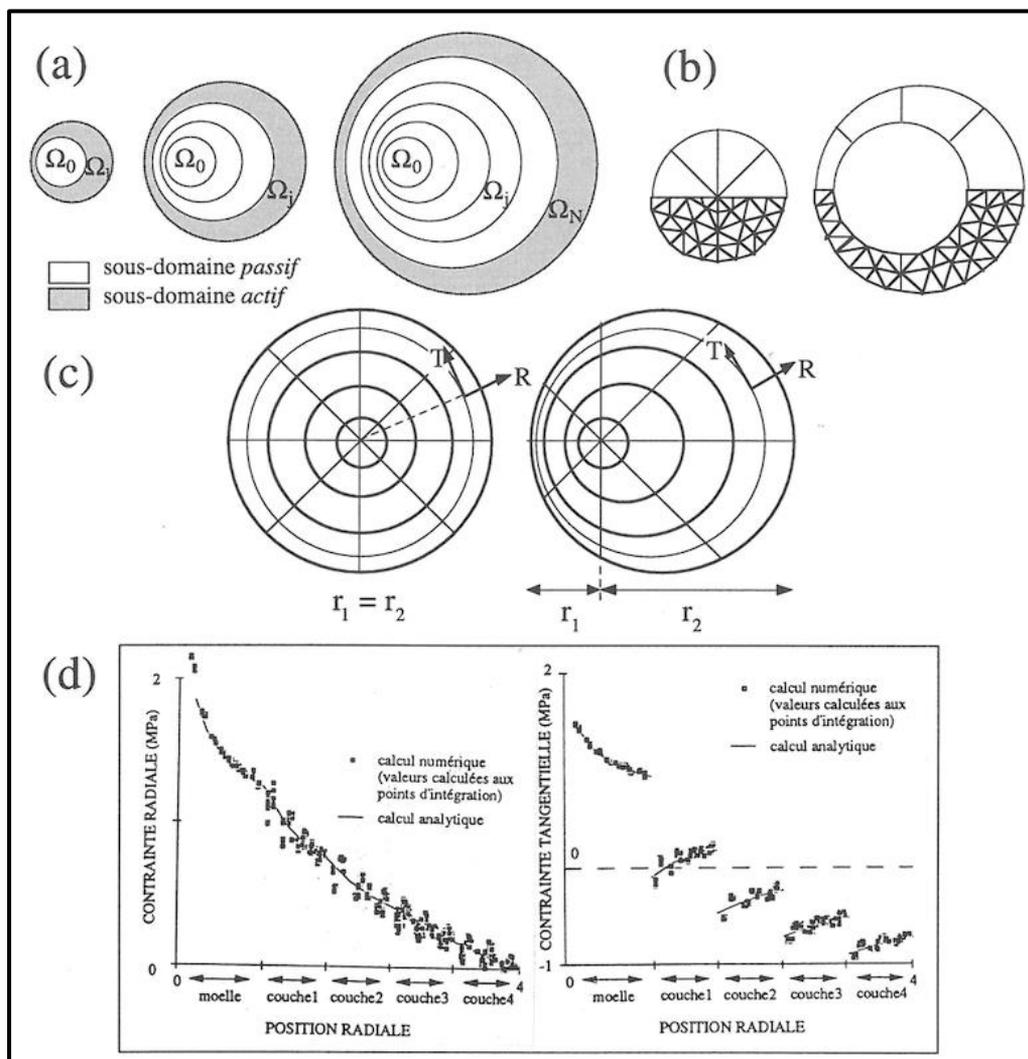
On considère à chaque fois le cas d'un axe vertical chargé en compression et d'un axe horizontal chargé en flexion (pour simplifier on se limite à la contrainte longitudinale et le matériau est supposé isotrope transverse et homogène). En (A) on retrouve des situations classiques de résistance des matériaux : les efforts  $F$  ou  $M$  sont appliqués sur une poutre déjà constituée. En (B), on voit le résultat d'un calcul de "résistance des tiges" dans lequel *la matière ne peut supporter de contraintes qu'à partir du moment où elle existe* : la dernière couche de bois s'est déposée sans mise en précontrainte (pas de contrainte générée par la maturation), de sorte que sur les profils indiqués la contrainte est nulle en périphérie. Le calcul doit être fait étape par étape, en tenant compte de l'histoire relative de la fabrication  $D(t)$  et du chargement  $F(t)$ ,  $M(t)$ .

## I-2.2. SIMULATION NUMERIQUE DES CONTRAINTES DE CROISSANCE TRANSVERSES

Une approche uniaxiale telle que celle présentée ci-dessus permet de rendre compte de la croissance excentrique. En revanche, le calcul 3D donnant toutes les composantes de la contrainte de croissance ne peut être fait au moyen de calculs semi analytiques que dans le cas de tiges circulaires, modélisées comme la juxtaposition de tubes concentriques [Archer (1986), Fournier (1989)]. Il faut, dans le cas le plus général, avoir recours au calcul numérique. Il est toutefois possible, pour traiter le cas d'une portion de tige à faibles gradients de propriétés longitudinales, de se ramener à des calculs 2D en traitant le problème en déformations planes généralisées. Cela consiste à introduire des degrés de liberté supplémentaires par rapport à la déformation plane, pour tenir compte de mouvements d'ensemble des sections, autrement dit on combine théorie de milieu curviligne et hypothèses de déformations planes. On peut ainsi montrer qu'en l'absence de torsion, la solution s'obtient par la combinaison linéaire de quatre calculs en déformation plane.

La figure I-4 montre un exemple de simulation en contrainte plane. La raison de ce choix tient au fait qu'au départ, nous cherchions à connaître l'état mécanique dans un disque de bois de faible épaisseur (rondelle). En toute rigueur, nous aurions dû l'obtenir sous les hypothèses de déformations planes généralisées puis simuler le tronçonnage, comme cela sera vu plus loin. Pour simplifier, nous avons généré le champ initial par ce calcul en contraintes planes qui néglige l'effet du cumul des contraintes longitudinales.

Pour le calcul de contraintes longitudinales tels que ceux présentés plus haut, Fournier (1989) a montré que la prise en compte de la maturation transverse est superflue. En revanche, les contraintes transverses présentes dans le tronc dépendent pour une part non négligeable de la maturation longitudinale. Ce découplage partiel longitudinal-transverse tient à la très forte anisotropie du bois.



**Fig. I-4 : Simulation des contraintes résiduelles dans une rondelle d'après Jullien (1995)**

(a) L'effet de la maturation est simulé par l'apparition d'une déformation thermique qui se produit, à chaque étape de la croissance, dans le dernier cerne formé (sous-domaine "actif"). (b) Le maillage du premier cerne (à droite) doit être ajouté à celui de la moelle (à gauche) pour constituer le maillage du premier problème incrémental. Les cernes sont supposés circulaires mais non concentriques. La génération du maillage se fait soit automatiquement à partir d'un choix de paramètres géométriques préétablis ou interactivement, cerne par cerne. (c) Le comportement est élastique orthotrope et défini pour chaque élément ; les directions  $R$  et  $T$  sont calculées par interpolation en se référant aux limites de cernes les plus proches. Dans la version actuelle de l'outil, les paramètres du comportement et de la maturation sont constants par secteur de  $45^\circ$ . (d) Comparaison dans le cas axisymétrique, entre le calcul analytique et la simulation numérique pour les composantes radiale et tangentielle de la contrainte suite à la maturation de quatre couches.

### I-3. INTERPRETATION RHEOLOGIQUE DES BLOCAGES BIOMECHANIQUES

Nous nous sommes contenté, dans le chapitre précédent, d'une approche élastique qui suffit pour rendre compte de l'interaction entre la croissance de la tige et la mise en place d'un champ de contrainte de croissance. Nous nous sommes placé du point de vue de la tige. Pour aller plus loin dans l'analyse rhéologique des phénomènes, il faut pouvoir adopter aussi le point de vue du bois. Cela sera le thème de ce chapitre.

#### I-3.1. DE LA TIGE AU BOIS : LE SENS DU TEMPS

Le passage de la biomécanique de la tige en tant qu'empilement concentrique de couches à la mécanique du bois matériau implique une perception inverse de l'écoulement du temps. Du point de vue de la tige, le temps commence à l'apparition de sa moelle issue d'un bourgeon. Le sens du temps peut être signifié par des flèches irradiant du cœur vers la périphérie (figure I-5). Du point de vue du bois, le point de départ est l'apparition des cellules à partir de la périphérie. La notion temporelle à prendre en compte est plutôt celle de l'âge du bois, ce que symbolisent les flèches tournées vers le centre. Cette dualité reflète le travail de l'anatomiste amené, pour situer dans le temps les événements imprimés dans la structure du bois, à compter les cernes soit à partir de la moelle, soit à partir de l'écorce [Chanson et Gril (1991)].

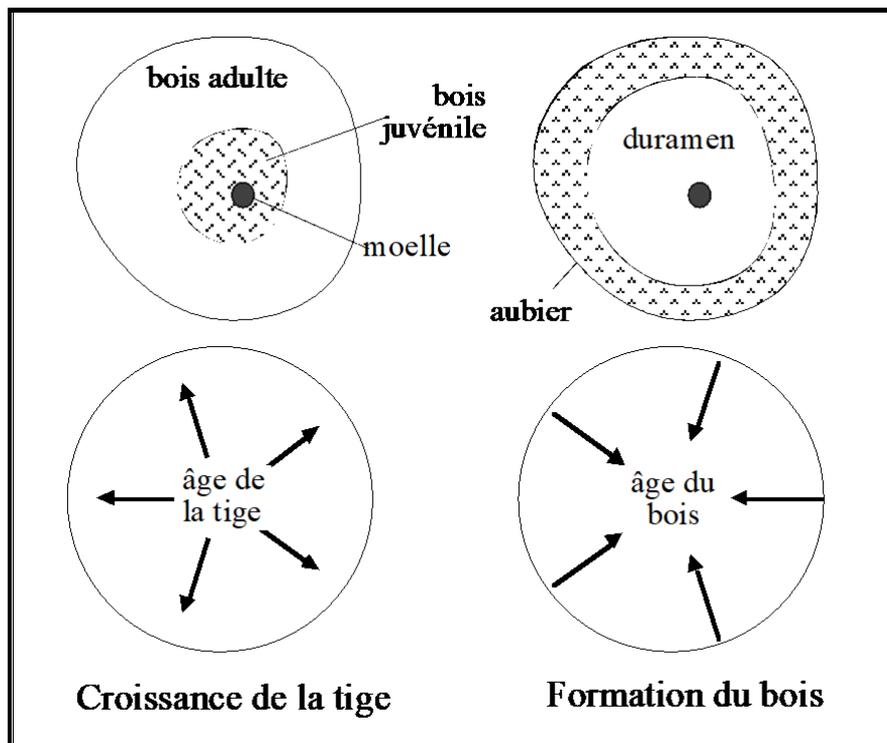
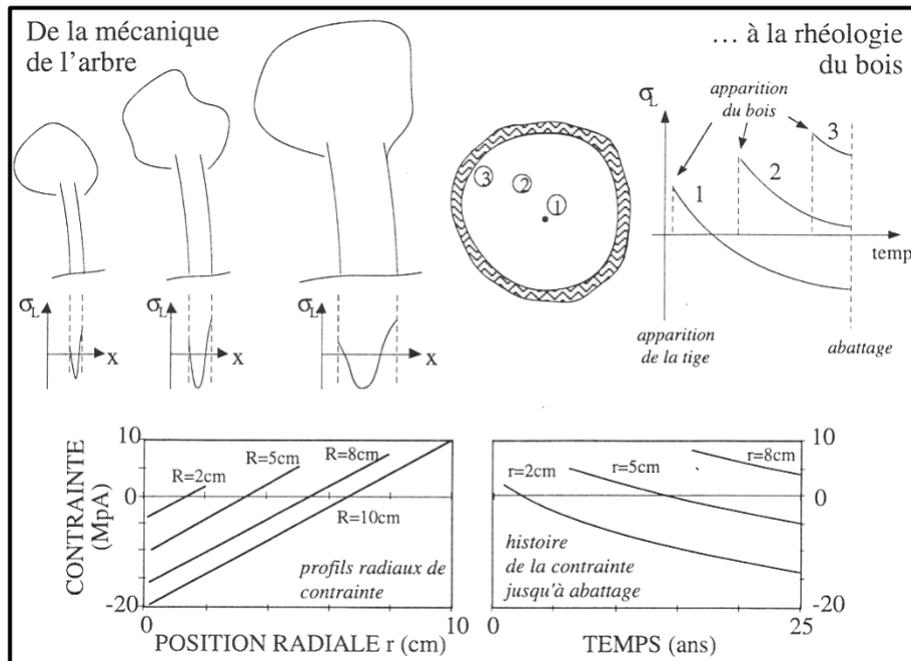


Fig. I-5 : Mécanique de la tige et mécanique du bois

En terme de contraintes mécaniques, les deux points de vue se traduisent par une lecture inverse de la fonction à deux variables  $\sigma(y,t)$  (figure I-6). Les profils  $\sigma(y;t_i)$  à des instants  $t_i$  donnés indiquent l'évolution de l'état mécanique de la tige au fur et à mesure de sa croissance secondaire. Inversement, du point de vue du bois situé à la position  $y_j$ , la courbe  $\sigma(t;y_j)$

représente l'évolution de la contrainte subie par ce bois depuis sa formation à l'instant  $\tau(y_j)$ . Ainsi l'écart d'âge parfois considérable entre du bois extrait près du cœur et un autre près de l'écorce se traduit par une différence de la "préhistoire" rhéologique de ces bois, c'est-à-dire du chargement mécanique qu'ils ont supporté depuis leur formation respective jusqu'à l'abattage de l'arbre [Gril (1991)].



**Fig. I-6 : Profils de contrainte dans la tige et préhistoire mécanique du bois**

On a simulé la contrainte de croissance longitudinale en supposant qu'à tout étape de la croissance de la tige donnée par son rayon  $R$ , y règne du fait de la maturation un champ autoéquilibré (on néglige les masses supportées) linéaire avec le rayon  $r$  compté de la moelle à la périphérie, de la forme :  $\sigma=c \cdot (3r-2R)$  (avec  $c=1$  pour  $\sigma$  en MPa et  $r$  en cm). Pour passer des profils de contrainte à différents stades de développement de la tige (gauche) à l'histoire rhéologique du bois en fonction de sa position (droite), il faut ajouter l'information de la loi de croissance, ici on a supposé que la section de la tige augmente linéairement avec la temps, ici  $R=2 \cdot t^{1/2}$  avec  $t$  en années comptées depuis l'apparition de la moelle et  $R$  en cm. Ici le comportement du matériau est supposé élastique.

Or, le bois est viscoélastique, c'est-à-dire qu'une partie de sa réponse à des sollicitations mécaniques est différée dans le temps. Donc aux effets temporels de la mise en place progressive de la matière et de sa mise en charge, s'ajoutent ceux de la réaction comportementale du matériau. Quelle relation peut-il exister entre tous ces facteurs liés au temps ?

Un comportement viscoélastique (voire élasto-visco-plastique) peut être facilement introduit dans le modèle présenté au chapitre précédent. Mais si l'on parle de viscoélasticité pour le bois mature, il faut a fortiori l'envisager pour le bois en formation, susceptible de produire une très forte mobilité moléculaire. Cette double prise en compte de la viscosité, pour le bois en formation et le bois mature, va faire l'objet de la suite de ce chapitre.

### I-3.2. VISCOELASTICITE DU BOIS ET RHEOLOGIE DE LA MATURATION

Afin d'introduire le caractère viscoélastique nous supposons que le comportement rhéologique du bois est décrit par le modèle de la figure I-7c, où le ressort de complaisance  $U$  est en série avec deux mécanismes de Kelvin respectivement de complaisance  $V$  et  $W$  et de temps caractéristique  $\tau^V$  et  $\tau^W$ , ainsi qu'un élément de déformation induite  $\mu$ . Le bois possède au début de sa formation une rigidité très faible qui va augmenter progressivement avec le dépôt des couches de la paroi, tandis que la tendance à la déformation induite par la maturation n'intervient de façon importante qu'une fois la rigidification bien engagée (figure I-7a). Nous schématisons ici ces évolutions par la succession d'événements suivants (I-7b) :

- à  $t_0$ , le bois se dépose mais sa rigidité est nulle ;
- à  $t_1$ , il commence à "exister" rhéologiquement mais avec  $\tau^V \approx 0$  et  $\tau^W \approx 0$ , de sorte que sa rigidité vaut  $E_m = (U+V+W)^{-1}$  ;
- à  $t_2$ , la déformation de maturation passe de 0 à  $\mu$  ;
- à  $t_3$ , les temps caractéristiques  $\tau^V$  et  $\tau^W$  acquièrent leur valeur mature, avec  $\tau^V \ll \tau^W$ , la rigidité instantanée vaut  $E=U^{-1}$ .

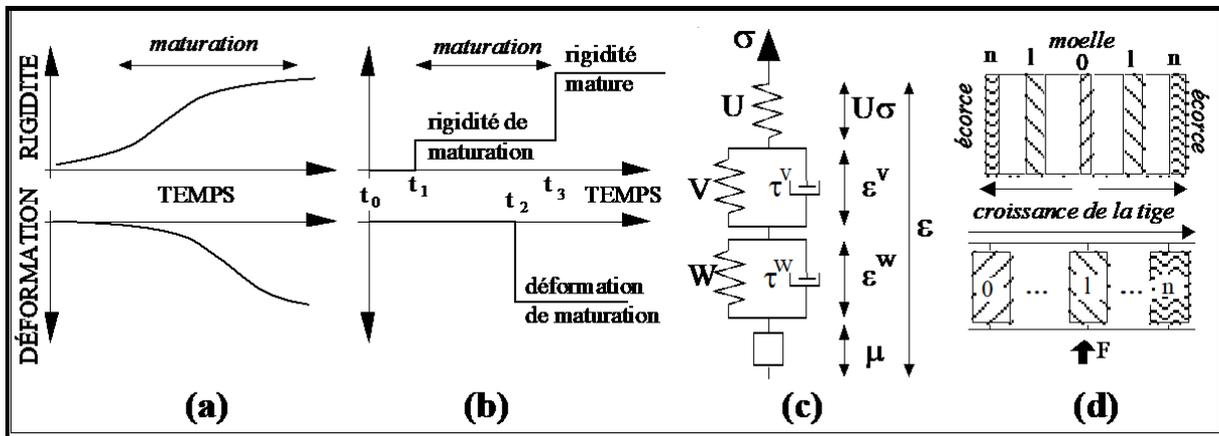


Fig. I-7 : Interprétation rhéologique de la maturation

(a) cinétiques de la rigidification et de la déformation de maturation ; (b) schématisation des cinétiques par un palier de maturation caractérisé par une faible rigidité (amortisseurs "ouverts") et durant lequel se produit la déformation de maturation ; (c) modèle rhéologique uniaxial correspondant au comportement d'une couche de bois ; (d) disposition en parallèle des couches dans un cas axisymétrique, chaque couche étant décrite par le modèle (a).

A tout instant, la déformation  $\varepsilon$  du matériau soumis à la contrainte  $\sigma$  est la somme des composantes *élastique* ( $\varepsilon^e = U\sigma$ ), *visqueuse à moyen terme* ( $\varepsilon^v$ ), *visqueuse à long terme* ( $\varepsilon^w$ ) et de *maturation* ( $\mu$ ) :

$$\varepsilon = U \cdot \sigma + \varepsilon^v + \varepsilon^w + \mu$$

La viscosité représentée par  $\varepsilon^v$  est active durant la vie de l'arbre et agit sur la relaxation des contraintes de croissance. L'élément  $\varepsilon^w$  correspond à des déformations viscoélastiques bloquées lors de la formation, dont la cinétique est trop lente à température ambiante pour s'exprimer complètement durant la vie de l'arbre. L'évolution de la déformation des amortisseurs  $\varepsilon^v$  et  $\varepsilon^w$  est donnée par des lois du premier ordre:

$$\frac{\partial \varepsilon^v}{\partial t} = \frac{V \cdot s - \varepsilon^v}{\tau^v} ; \quad \frac{\partial \varepsilon^w}{\partial t} = \frac{W \cdot s - \varepsilon^w}{\tau^w}$$

Durant la période de maturation ils sont “ouverts”, c’est-à-dire que  $\tau^v$  et  $\tau^w$  sont très bas et la complaisance effective du matériau est  $U+V+W$ . A la fin de la maturation, la valeur alors atteinte par la contrainte  $\sigma$  est la *contrainte initiale de croissance* mentionnée plus haut. La notant  $\hat{S}$  on a :

$$\varepsilon^e = U \cdot \hat{S} \quad ; \quad \varepsilon^v \approx V \cdot \hat{S} \quad ; \quad \varepsilon^w \approx W \cdot \hat{S} \quad ; \quad \varepsilon \approx (U+V+W) \cdot \hat{S} + \mu$$

Nous disposons ainsi d’un modèle viscoélastique de comportement auquel peut être appliqué le calcul de cumul de couches du chapitre précédent. Nous nous plaçons cette fois-ci dans le cas particulier d’une portion de tige cylindrique, soumise à un chargement extérieur normal à sa section et dont la maturation des nouvelles couches se produit d’une manière homogène sur la périphérie. Autrement dit, nous envisageons un problème parfaitement axisymétrique, qui pourra se traiter par une représentation rhéologique en parallèle dont chaque élément correspond à une couche de bois déposée en périphérie aux étapes successives de la croissance en épaisseur de la tige (figure I-7d). Le calcul est effectué de manière incrémentale, en supposant chaque couche déposée homogène, et décrite par le modèle rhéologique qui vient d’être présenté.

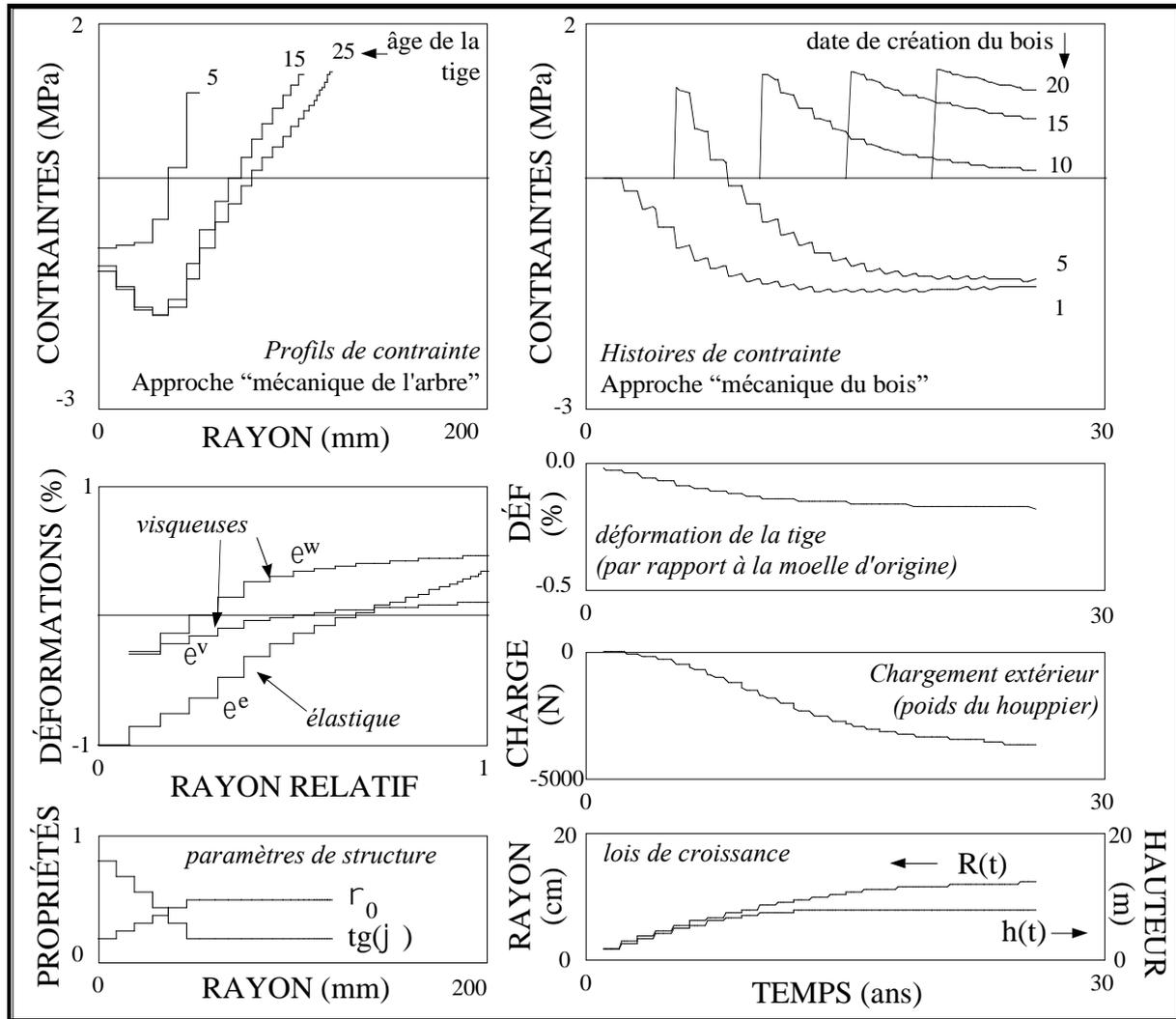
Afin de donner une cohérence physique au modèle, nous supposons en outre que toutes les variations sont ramenées à celles de deux propriétés structurelles de base, la densité anhydre  $\rho$  et l’angle des microfibrilles  $\varphi$ . C’est ainsi que les complaisances et la déformation de maturation sont modélisées par :

$$U = (u_0 + u_1 \text{tg}^2 \varphi) \rho_p / \rho \quad ; \quad V = (v_0 + v_1 \text{tg}^2 \varphi) \rho_p / \rho \quad ; \quad W = (w_0 + w_1 \text{tg}^2 \varphi) \rho_p / \rho$$

$$\mu = \mu_0 \cos^2 \varphi + \mu_1 \sin^2 \varphi$$

ou  $\rho_p$  désigne la densité anhydre de la paroi ( $\approx 1.5$ ),

La figure I-8 montre un résultat de simulation numérique correspondant à la base d’un tronc ayant eu une croissance parfaitement équilibrée (axisymétrique). Nous avons pris soin de disposer d’un côté les profils en fonction du rayon correspondant au point de vue de la tige, de l’autre les graphes temporels donnant le point de vue du bois.



**Fig. I-8 : Résultat d'une simulation du modèle viscoélastique**

On considère le cas d'une portion de tige âgée de 25 ans, chaque couche correspondant à un cerne annuel, avec les valeurs suivantes des constantes : complaisances (en  $\text{GPa}^{-1}$ )  $u_0=80$ ,  $v_0=20$ ,  $w_0=100$ ,  $u_1=60$ ,  $v_1=40$ ,  $w_1=200$  ; déformation de maturation (%) :  $\mu_0=-0.1\%$ ,  $\mu_1=+0.2\%$  ; temps caractéristiques (ans)  $\tau^v=10$ ,  $\tau^w=100$ . Nous avons envisagé le cas de forts gradients radiaux de propriétés liés à la transition entre bois juvénile et adulte. Durant les cinq premières années (bois juvénile) la densité  $\gamma$  du bois formé augmente et l'angle des microfibrilles  $\varphi$  diminue, puis reste stable (bois adulte) : c'est typiquement le cas des résineux. La charge est assimilée à la masse d'un cylindre de rayon  $R(t)$ , de hauteur  $h(t)$ , et de densité 1 ; chaque année 20% est appliqué avant la maturation, 60% pendant et 20% après [Gril et Fournier (1993)].

## **CONCLUSION DE LA PARTIE I**

*Nous avons identifié deux sources de blocage biomécanique dans le bois : la croissance et la maturation. Par croissance il faut entendre ici la mise en place progressive de la matière et des charges ; par maturation le processus à l'origine de la mise en charge initiale du matériau.*

*Nous avons choisi d'interpréter le processus de blocage dans un cadre de viscoélasticité linéaire. Il n'est pas prouvé que ce type de comportement soit effectivement celui du bois dans l'arbre, surtout pendant la phase d'élaboration. C'est dans un objectif de simplicité que nous avons choisi cette voie, d'autant plus qu'elle sera bien adaptée à l'étude du bois matériau.*

*Outre que les profils et les histoires de contraintes sont modifiés par la prise en compte de la viscoélasticité, un apport important de cette approche par rapport à un calcul élastique consiste dans l'estimation des déformations bloquées, susceptibles de se libérer après la découpe par diminution des temps de relaxation. Cela constitue le thème de la partie suivante.*

## Deuxième partie

### DEBLOCAGE THERMOMECHANIQUE DANS UN BILLON VERT

Entre l'abattage de l'arbre et le début du séchage du bois, sont effectués des découpes ou *débits* déterminants pour le rendement global de la transformation. Nous avons vu que les contraintes de croissance sont favorables à la tenue mécanique de la tige vivante puisqu'elles placent les couches périphériques les plus sollicitées sous une précontrainte (traction axiale et compression tangentielle) diminuant les risques d'endommagement du bois ; et cela au dépend du cœur où au contraire compression longitudinale et traction transverse sont susceptibles de provoquer flambement axial ou rupture transverse. Or, le premier des débits appliqués à un arbre est le tronçonnage, dont nous verrons qu'il produit une redistribution défavorable des contraintes résiduelles, c'est-à-dire risquant d'aggraver la tendance initiale à la fissuration à cœur. Les débits ultérieurs visent souvent à compenser cet effet négatif du tronçonnage. Ainsi le débit en plots (en plateaux parallèles successifs) permet-il de diminuer les contraintes résiduelles, avec en contrepartie l'apparition de déformations des pièces parfois gênantes (figure II-1). L'option

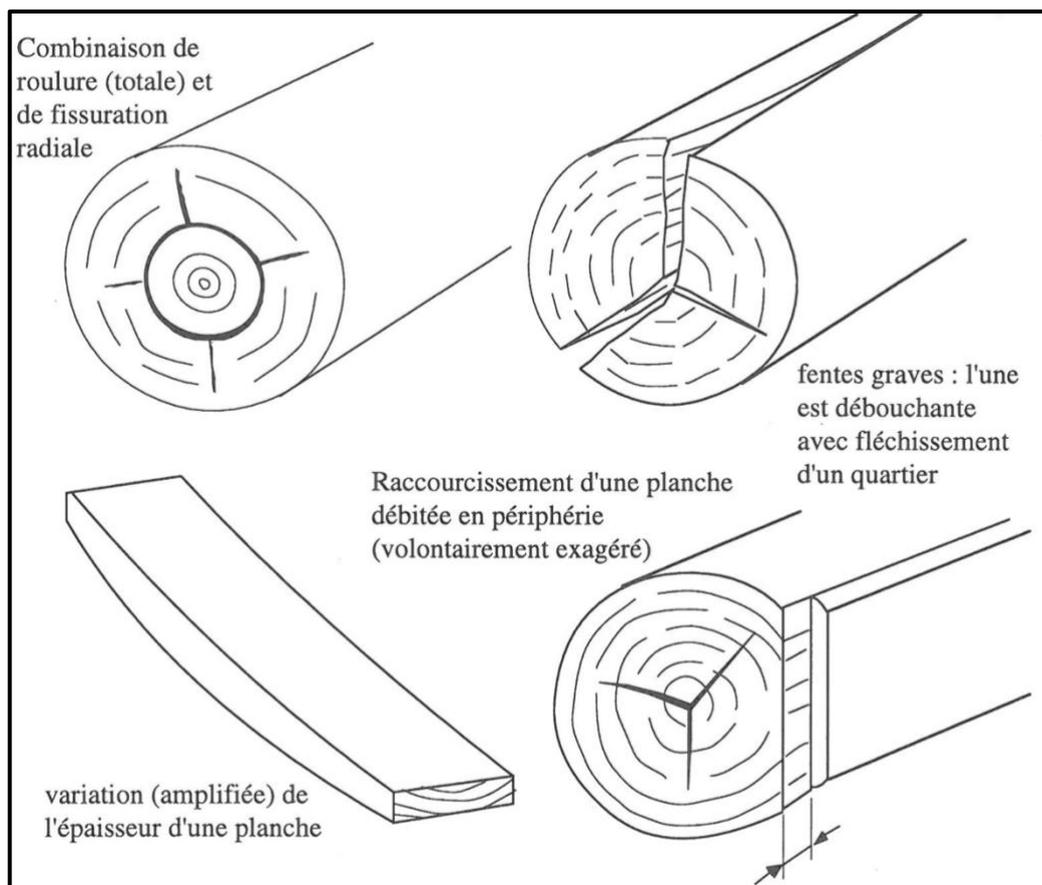


Fig. II-1 : Quelques défauts liés aux contraintes de croissance

du déroulage aboutit à un placage encore plus libre de contraintes résiduelles macroscopiques mais avec cette fois-ci le problème d'être tributaire de la manipulation de bois ronds ; or, ce type d'usinage est fortement sensible au défaut que constitue la fissuration à cœur.

Si rien n'est fait pour stopper des fissures à cœur apparues à l'extrémité d'une grume après abattage, elles tendent à se propager. Cette fissuration différée est considérablement accélérée par l'étuvage humide. Or, celui-ci est souvent préconisé en préalable au débit, qu'il s'agisse de sciage, de déroulage ou de tranchage, plus particulièrement dans le cas d'essences denses qu'il est nécessaire de "ramollir" pour favoriser les conditions de coupe. Le choix de la température d'étuvage doit donc résulter d'un compromis entre le ramollissement indispensable et la fissuration à éviter.

Tous ces problèmes rencontrés dans les premières étapes de la transformation du bois proviennent des blocages biomécaniques dont la mise en place a été analysée dans la première partie. Les diverses découpes, du fait qu'elles reviennent à annuler certaines des composantes des contraintes résiduelles, produisent de la recouvrance. Comme sur le schéma de la figure 0-1, cette recouvrance peut être instantanée ou différée, et accélérée par le traitement hygrothermique. Nous voici donc ramenés au thème annoncé par l'exemple de l'introduction, avec une recouvrance hygrothermique d'une autre nature.

L'objet de cette partie est l'étude des conséquences technologiques des blocages biomécaniques et de leur déblocage thermomécanique. Avant d'aborder la réaction d'une portion de tige (rondelle ou billon) à une variation de température, ce qui constitue le problème thermomécanique proprement dit, il faut :

- d'une part connaître le comportement thermomécanique d'un échantillon de bois vert ;
- d'autre part déterminer l'état mécanique initial de la structure qui résulte d'une série de découpes opérées à partir de l'abattage, auxquelles s'ajoute le cas échéant de la fissuration.

## **II-1. COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE DU BOIS VERT**

L'élévation de la température est susceptible d'avoir, sur un matériau viscoélastique précontraint tel que le bois vert, un double effet : sur le comportement d'un côté, sur les précontraintes et les déformations bloquées de l'autre. Ces deux aspects vont être examinés successivement dans ce chapitre. Le volume envisagé correspondra, sauf exception, à l'échelle macroscopique du bois "matériau" illustré sur la figure 0-3a : contenant suffisamment de cernes pour ne pas devoir prendre en compte l'hétérogénéité intra-cerne et assez petit pour éviter de devoir prendre en compte la courbure des cernes.

### **II-1.1. ACTIVATION THERMIQUE DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE**

Le caractère viscoélastique du bois, lié à sa nature polymérique, va de pair avec une forte sensibilité à la température. Les lignines, responsables de la rigidité remarquable des plantes dites "ligneuses", possèdent à température ambiante un comportement vitreux mais qui devient caoutchoutique au delà d'une certaine température.

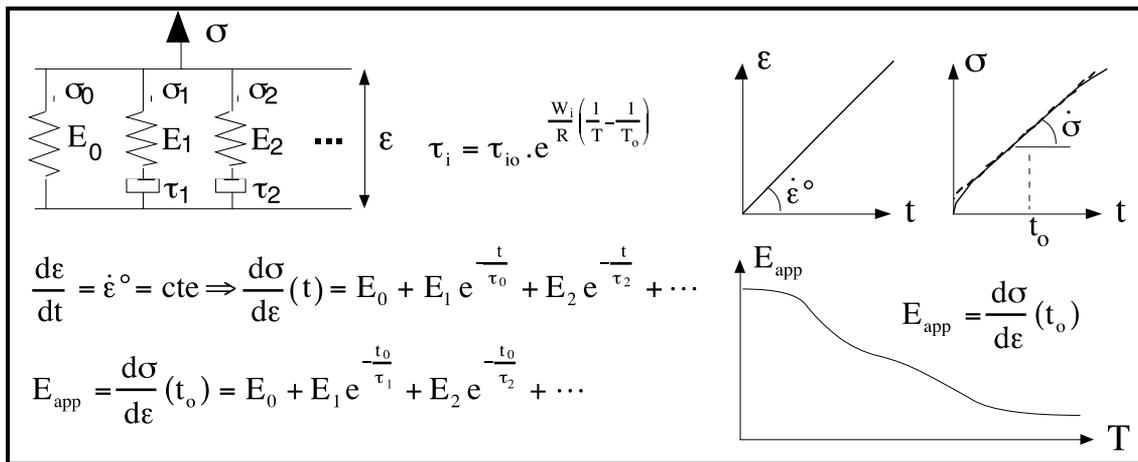
En terme de modèle rhéologique cet effet de la température est représentée par la décroissance des temps caractéristiques avec la température, par exemple sous la forme de loi d'Arrhenius comme proposé par Eyring (1936) :

$$t \propto \exp \frac{E_a}{RT}$$

où  $E_a$  est l'énergie d'activation apparente,  $R$  la constante des gaz parfaits et  $T$  la température. Cette expression véhicule le concept d'équivalence temps-température, selon laquelle une élévation de température permet d'accélérer les processus visqueux, dans une mesure quantifiée par l'énergie d'activation. C'est ainsi que selon Goring (1963), à l'état saturé la température de transition vitreuse des lignines varie dans la plage 77-128°C et celle des hémicelluloses 54-142°C, tandis que d'après Takamura (1968), elle vaut 60°C pour les lignines à 15% de taux d'humidité et 20°C pour les hémicelluloses à 60% de taux d'humidité.

A partir de résultats en vibration, Salmen (1984) trouve que dans la direction transverse aux fibres la température de transition varie de 86°C pour une fréquence de 0,1 Hz et à 104°C pour 100 Hz, ce qui correspond à une énergie d'activation de 395 kJ/mol. En extrapolant aux temps typiques des essais quasistatiques, on trouve une valeur d'environ 65°C.

La complexité de la structure polymérique du bois se traduit par une large distribution des temps de relaxation et des activations thermiques correspondantes. Ainsi le modèle de la figure I-10a peut être rendu thermoactivé en attribuant une loi de variation différente aux temps  $\tau^v$  et  $\tau^w$ .



**Fig. II-2 : Caractérisation de l'activation thermique du comportement viscoélastique.**

Une série d'essais quasistatiques réalisés à plusieurs niveaux de température permet d'identifier les paramètres du comportement viscoélastique : rigidités  $E_i$ , temps caractéristiques de référence  $\tau_{i0}$ , énergies d'activation  $W_i$ . Tous ces paramètres sont indépendants de la température. Les températures de transition vitreuse mises en évidence par un tel essai sont dépendantes de la fenêtre expérimentale, selon le principe d'équivalence temps-température.

A partir de la connaissance du comportement viscoélastique thermoactivé il est possible de déduire l'influence de la température sur les rigidités apparentes dans une fenêtre expérimentale donnée. C'est le cas par exemple d'une série d'essais quasistatiques réalisés à plusieurs niveaux de température, qui peut ainsi servir à identifier les paramètres du comportement viscoélastique

(figure II-2). La méthode de l'essai de fluage à température croissante développé par Gènevaux (1989) est un moyen particulièrement performant pour permettre cette identification.

Il est important, pour traiter des problèmes mettant en jeu la fissuration du bois, de connaître l'évolution conjointe des rigidités et des caractéristiques du comportement limite avec la température. C'est le cas de la fissuration à cœur induite par l'étuvage, mais aussi de l'étude des processus de coupe [Thibaut (1988)].

Pour caractériser la rupture il faut disposer de données sur le comportement post linéaire d'une part, et de critères énergétiques caractérisant la cohésion d'autre part. En traction transverse le bois est approximativement élastique-fragile, et son comportement post linéaire bien décrit par la donnée des contraintes maximales radiale et tangentielle, avec par exemple comme critère bidimensionnel :

$$\sigma_R < \sigma_{Rm} \ ; \ \sigma_T < \sigma_{Tm}$$

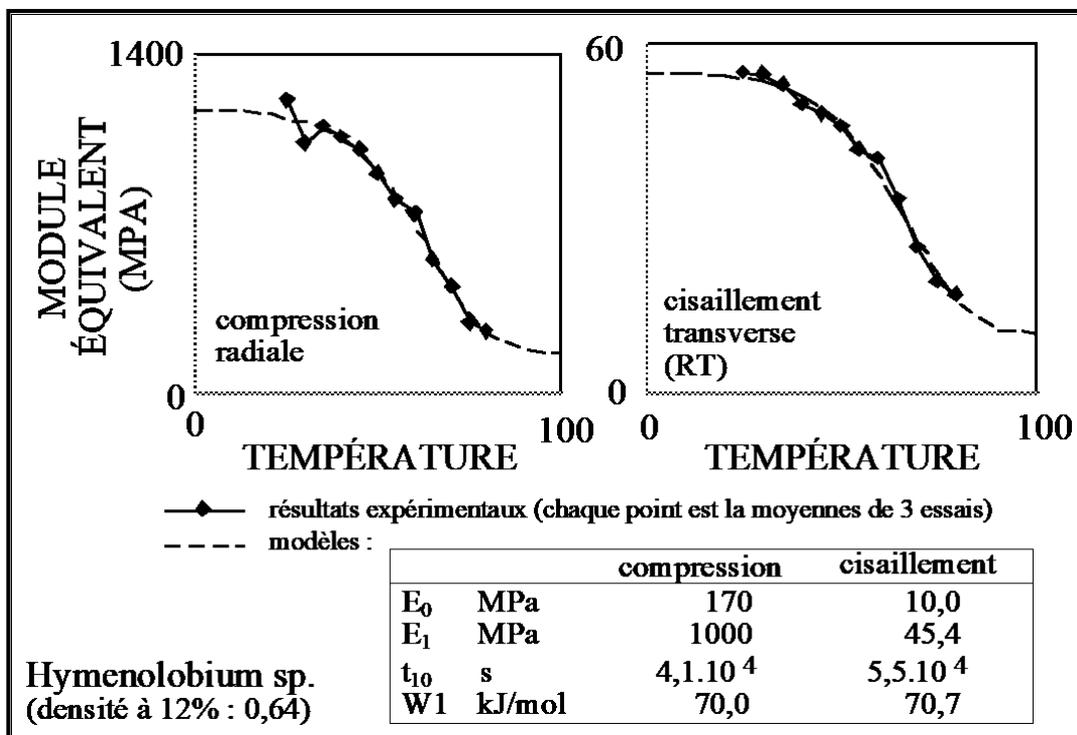


Fig. II-3 : Influence de la température sur le comportement transverse du bois vert.

Une mise en évidence expérimentale simple des transitions vitreuses consiste à effectuer un essai quasistatique à des températures données croissantes et observer la décroissance de la rigidité apparente. Le travail de J. Beauchêne a été effectué en vue de l'optimisation de la température d'étuvage vis-à-vis du processus de coupe : 10 essences de densité variant de 0,3 à 1,1 ont été testées de 25 à 80°C de 5 en 5°C. On voit ici le résultat pour le bois dit Saint-Martin Jaune (Hymenolobium sp., infradensité moyenne 0,77). Le modèle de la figure précédente a été appliqué aux estimations de la rigidité apparente obtenues à partir des pentes initiales des courbes effort-déplacement. La durée de l'essai de compression est de 14 min. et celle de l'essai de cisaillement de 10 min (paramètre  $t_0$ ). La température de référence est 293°K (20°C). On remarque que dans le cas montré, les deux essais donnent des paramètres optimisés de temps et d'énergie très proches.

L'énergie nécessaire à la décohéation peut être déduite de l'aire de la courbe effort-déplacement dans un essai de flexion d'une éprouvette entaillée. La mise en place de procédures

expérimentales permettant d'acquérir toutes ces données fait l'objet d'un effort important depuis quelques années en collaboration avec le CIRAD-Forêt. La figure II-3 montre, à titre d'exemple, l'application de la procédure décrite sur la figure II-2 à des résultats obtenus par Beauchêne (1996).

## II-1.2. ANALYSE DE LA DEFORMATION THERMIQUE DU BOIS VERT

Le prélèvement d'un échantillon de bois implique de l'avoir désolidarisé par découpe de la matière environnante. Cela entraîne l'annulation de la contrainte subie par le bois dans l'arbre. Il en résulte une *recouvrance*, qui peut être soit instantanée, soit différée du fait de la nature viscoélastique du bois. Conformément au principe rappelé sur la figure 0-2 à propos du formage du bois, il est possible d'accélérer une recouvrance viscoélastique en chauffant le bois. Cette accélération est plus marquée pour un bois contenant suffisamment d'eau pour assurer la saturation des fibres, ce qui est en particulier le cas du bois *vert*, c'est-à-dire maintenu humide après son extraction de l'arbre. On parle alors de *recouvrance hygrothermique*.

Chauffer du bois vert apparaît donc comme un moyen commode de "débloquer" le matériau. Mais quelle relation établir en pratique entre la réponse thermique du bois vert et les déformations bloquées du fait de son élaboration ?

Lorsque le bois vert est chauffé, il se déforme bien plus que ne le laisseraient supposer les effets habituels d'expansion thermique dans les matériaux. La déformation thermique du bois vert est un phénomène complexe mettant en jeu plusieurs phénomènes. Nous basant sur les travaux de Kübler (1973b), Kübler (1987) et les résultats obtenus dans son travail de thèse par Berrada (1991), nous avons dénombré dans Gril et al. (1993b) six effets susceptibles d'intervenir lorsqu'un petit échantillon de bois vert est soumis, après avoir été rendu libre de contraintes mécaniques extérieures, à une élévation de température :

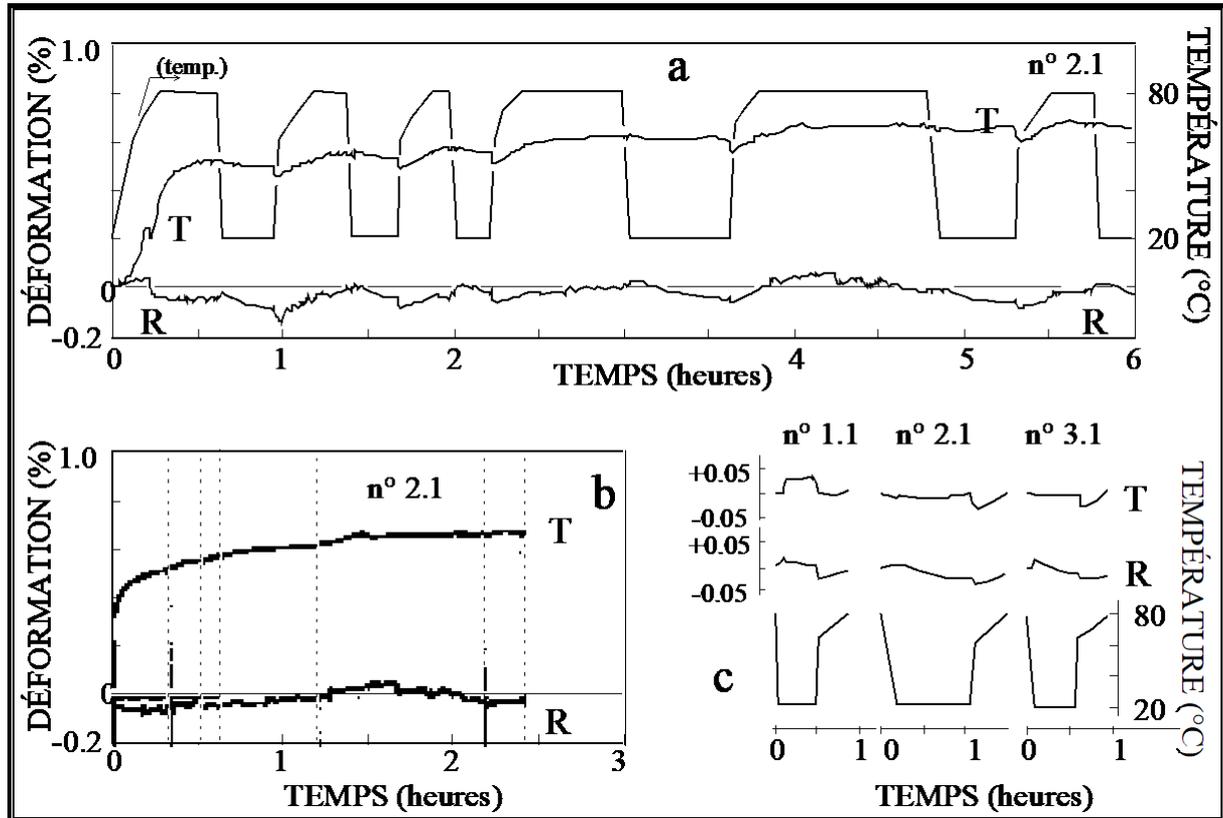
- (1) L'expansion thermique habituelle des polymères.
- (2) Un retrait dû à la diminution du p.s.f (point de saturation des fibres), celle-ci atteignant environ 1% par 10°C d'élévation de température [Siau (1984)].
- (3) Un effet transitoire de surpression dans les lumens dans le cas exceptionnel de bois à diffusivité particulièrement faible [Sharma et al. (1978)].
- (4) Un premier mécanisme de recouvrance viscoélastique, correspondant à la recouvrance différée des déformations induites par les contraintes de croissance *après* la formation du bois. Il relèverait de la viscoélasticité habituelle et pourrait même d'après Kübler (1973a) être observé en chauffant du bois séché en dessous du p.s.f..
- (5) Un second mécanisme de recouvrance différée de déformations bloquées *pendant* la formation et la maturation du bois. Pour l'observer il est nécessaire d'avoir un bois suffisamment humide (au delà du p.s.f.) et de le chauffer au-dessus de 60°C. Selon Kübler il est le seul à mériter le statut de "véritable" recouvrance hygrothermique (RHT).
- (6) La dégradation, probablement par hydrolyse des hémicelluloses, lorsque la durée et la température d'étuvage deviennent trop élevées [Grzeczynsky (1962)].

La combinaison de (1) et (2), et accessoirement (3), constitue la part réversible de la déformation thermique "pure", c'est-à-dire récupérable par refroidissement. Elle sera notée  $\varepsilon^0$ . La RHT dans le sens large, qui correspond à (4) et (5), sera notée  $\eta$ . Elle est obtenue, dans un domaine de temps et de température n'induisant pas la dégradation (6), en soustrayant de la déformation totale la contribution  $\varepsilon^0$  :

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 = \varepsilon - \varepsilon^0$$

où  $\eta_1$  correspond à (4) et  $\eta_2$  à (5). Cette décomposition suppose un premier découplage, en terme de déformation, des effets de nature physique représentés par  $\varepsilon^0$  et de la recouvrance totale  $\eta$  liée au chargement mécanique, et un second entre la recouvrance de premier type  $\eta_1$  et de second type  $\eta_2$ .

La validité du découplage entre  $\eta$  et  $\varepsilon^0$  est appuyée par des résultats expérimentaux tels que celui de la figure II-4 donnant la déformation tangentielle et radiale du Jujubier soumis à des cycles de température entre 20 et 80°C.



**Fig.II-4 : Recouvrance hygrothermique transverse du Jujubier [Gril et al. (1993b)]**

(a) On effectue des mesures de déformation tangentielle et radiale en continu sur un échantillon plongé dans de l'eau de température variable. Plusieurs cycles chaud-froid entre 20 et 80°C sont appliqués. Les montées en température sont rapides jusqu'à 60°C puis lentes jusqu'à 80°C, et le refroidissement est réalisé presque instantanément par remplacement de l'eau chaude par de l'eau froide ; la température indiquée est celle de l'eau. On constate qu'un processus réversible se superpose à un processus visqueux qui n'est actif que lorsque la température est suffisamment élevée. Afin de tester cette idée, nous avons, sur la courbe (b), procédé à une "contraction du temps" en ne retenant que les périodes où la température de l'eau valait 80°C. On constate que les portions de courbe se "recollent" assez bien, c'est-à-dire que lorsque la température de l'eau atteint 80°C l'échantillon retrouve presque exactement la déformation qu'il avait atteinte à la fin du palier de 80°C précédent. Ce qui s'est passé entre-temps peut être donc considéré comme réversible vis-à-vis de la température. La forme de la réponse est d'ailleurs à peu près la même pour tous les cycles froid-chaud de l'essai. En (c) est montrée l'allure de cette réponse réversible pour cet essai ainsi que, à titre de comparaison, pour deux autres essais similaires. L'enregistrement en continu des déformations a permis de déceler chez certains échantillons de jujubier des effets curieux, tels qu'une légère contraction tangentielle en tout début d'essai, ou une curieuse oscillation en "zigzag" de la déformation durant la première montée en température. Tout cela suggère une compétition entre plusieurs mécanismes.

On observe qu'un processus réversible se superpose à un processus visqueux qui n'est actif que lorsque la température est suffisamment élevée. On constate que lorsque la température de l'eau atteint 80°C l'échantillon retrouve presque exactement la déformation qu'il avait atteinte à la fin du palier de 80°C précédent, donc ce qui s'est passé entre-temps peut être considéré comme réversible vis-à-vis de la température. De fait la forme de la réponse est à peu près la même pour tous les cycles froid-chaud de l'essai.

La variabilité observée de la déformation thermique réversible peut laisser perplexe au premier abord ; elle s'explique par la compétition entre plusieurs phénomènes. Jusqu'à 70°C et dans le cas d'un bois au-dessus du p.s.f., l'effet (2) l'emporte sur (1), ce qui se traduit par un coefficient total de dilatation thermique négatif [Yokota et Tarkow (1962)]. Au-dessus de 70°C, ce coefficient devient soit moins négatif, soit positif, selon les auteurs [Kübler (1987)]. Cette limite correspondrait selon Salmen (1990) à la transition vitreuse de la lignine.

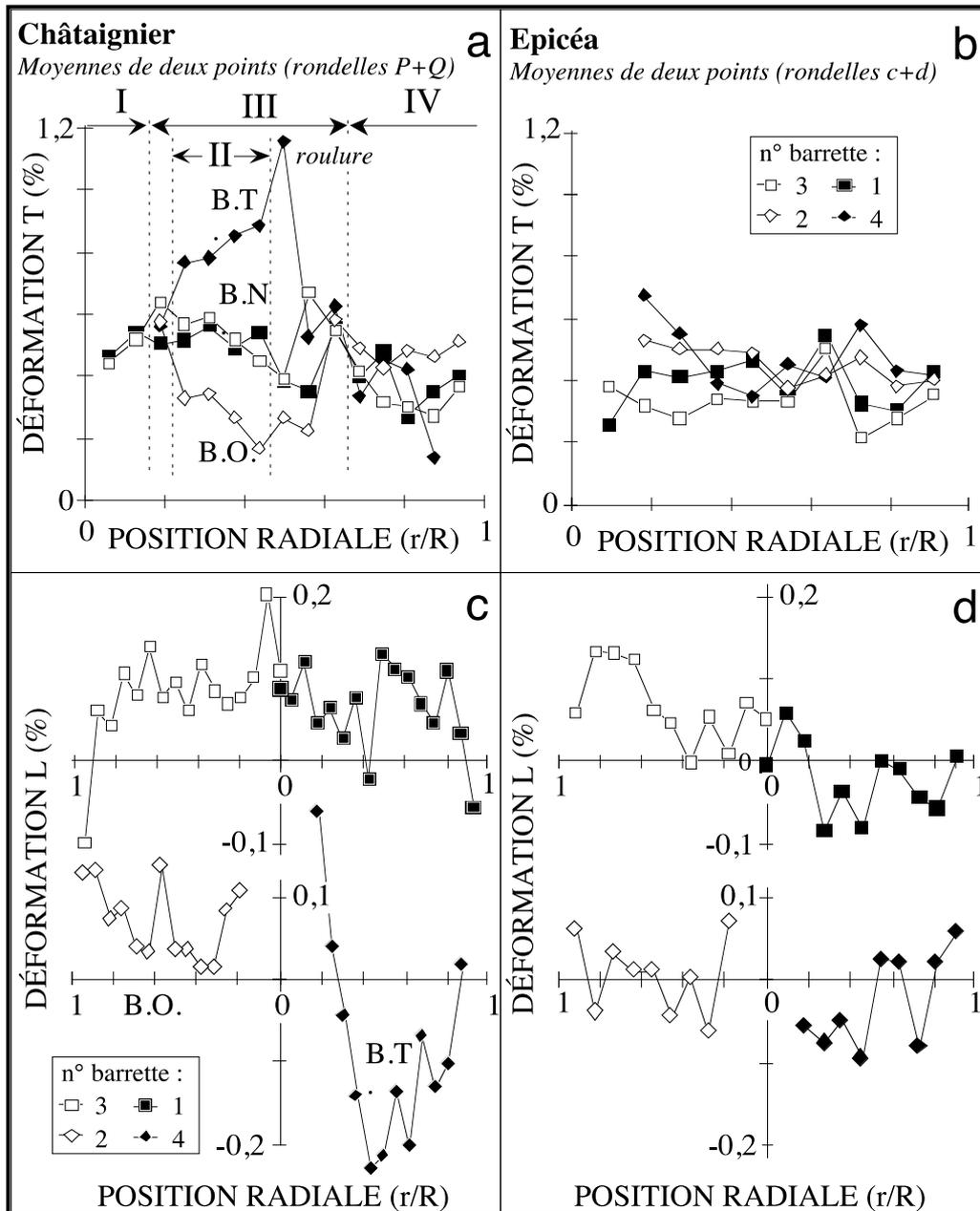
Nous avons montré dans Gril et al. (1993b) que la réponse thermique réversible du jujubier est convenablement décrite par un modèle linéaire par morceaux dans lequel seule la pente au-dessus de la température de transition de la lignine, sur laquelle les informations de la littérature ne concordaient pas entre elles, varierait d'un bois à l'autre.

### II-1.3. DECOMPOSITION DE LA RECOUVRANCE HYGROTHERMIQUE

Les valeurs les plus fortes de RHT sont observées dans la direction T, où elle peut dépasser +1% (allongement). Dans la direction R elle est négative (contraction) sans dépasser -0,2% et dans la direction L elle est en principe inférieure à  $\pm 0,2\%$ . Ces chiffres sont à comparer à l'ordre de grandeur de la recouvrance instantanée en périphérie, typiquement -0,2% pour T et +0,1% pour L (bois normal), et à la déformation thermique réversible  $\varepsilon^0$  de l'ordre de +0,1% entre 20 et 100°C. La direction tangentielle est de ce fait privilégiée pour l'étude de la RHT.

Dans la direction T les contraintes de croissance qui sont toujours de la compression en périphérie, doivent nécessairement être équilibrées par de la traction à cœur. Donc si la RHT n'était qu'un simple effet différé de l'action des contraintes de croissance, on devrait s'attendre à observer des recouvrances hygrothermiques de même signe que les recouvrances instantanées correspondantes, soit des valeurs tangentielles positives en périphérie mais négatives vers le cœur. Or, les variations radiales telles que celles citées par Kübler (1987) ou les nôtres obtenues sur le châtaignier ou l'épicéa (figure II-5) montrent au contraire des valeurs positives pour toutes les positions radiales, avec un gradient radial faible, voire négatif. Cela ne peut s'expliquer qu'en attribuant la RHT tangentielle principalement à la maturation : l'expansion gênée dans la direction T pendant la formation du bois, imprimée rhéologiquement dans la matière sous la forme d'une déformation viscoélastique bloquée, peut s'exprimer grâce à l'activation hygrothermique. La part importante prise par la transition vitreuse de la lignine dans la RHT conforte cette hypothèse puisque la formation de la lignine a lieu justement durant la phase finale de la maturation cellulaire et joue probablement un rôle important dans la genèse des contraintes de croissance comme cela a été discuté au chapitre précédent [Kübler (1973b)].

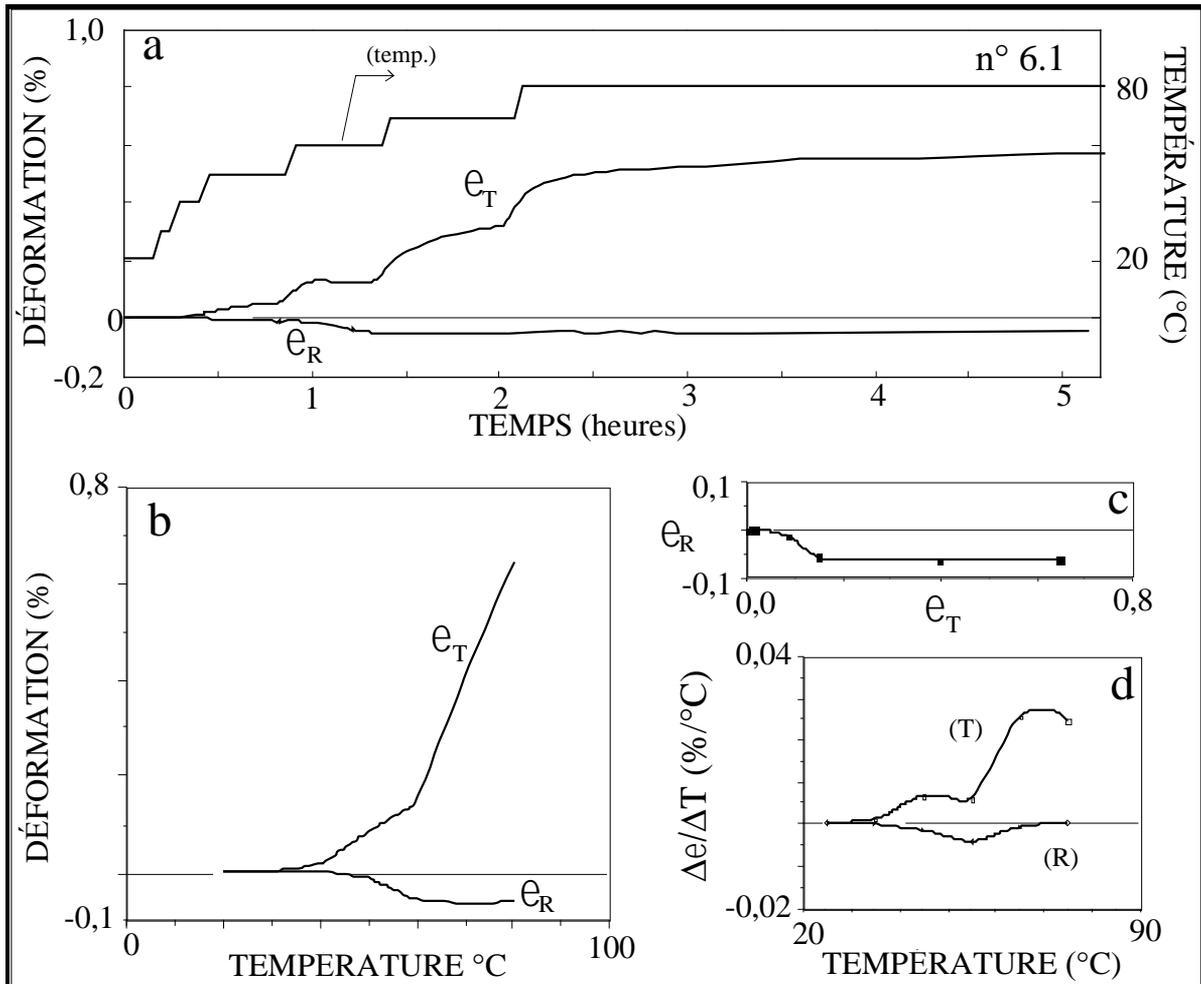
La figure II-5 montre aussi que la mesure de RHT est fortement influencée par la nature du bois, bois normal, de tension ou opposé. Plus récemment le DEA d'A. CORDIER a mis en évidence la très forte RHT longitudinale du bois de tension du hêtre, soulignant l'intérêt de faire précéder systématiquement des mesures de retrait par celle de la RHT [Gril et Cordier (1995)]



**Fig. II-5 : Variation radiale de la RHT chez le châtaignier et l'épicéa [Gril et al. (1993a)]**

Les déformations après une montée en température de 20 à 80°C suivie d'un séjour de 20 minutes à 80°C sont mesurées au moyen d'un capteur bidirectionnel à pointes (la déformation thermique réversible n'est pas éliminée). Les rayons de prélèvement des séries radiales de planchettes taillées dans le plan TL sont en quadrature et numérotés de 1 à 4 en tournant. Chaque point est la moyenne de deux mesures en des positions équivalentes sur des sections successives dans la bille. Pour le châtaignier (gauche) une bonne partie du rayon n° 4 contenait du bois de tension (B.T.), et donc le rayon n° 2 du bois opposé (B.O.). L'épicéa (droite) était aussi légèrement excentré mais ne présentait pas de bois de compression visible. La déformation tangentielle (haut) est représentée en fonction de la position radiale. Pour la déformation longitudinale (bas) les rayons sont groupés par deux, de manière à montrer la variation le long de chacun des deux diamètres étudiés ; cette représentation est mieux adaptée à la direction L car elle met en évidence d'éventuels effets de flexion de la tige. Dans le bois normal (B.N.) du châtaignier on observe une légère décroissance de la RHT tangentielle du cœur à la périphérie, et pour l'épicéa des valeurs stables. La déformation tangentielle du bois de tension est dans un rapport 3/2 par rapport au bois normal, 1/2 pour le bois opposé. La RHT longitudinale est aussi très marquée par le bois de tension, par contre la roulure sur le rayon n°4 influence la RHT tangentielle mais pas la longitudinale.

La figure II-6 montre le résultat d'un essai sur jujubier destiné à mettre en évidence les températures déclenchant la RHT. On en voit apparaître deux dans la direction T, une mineure vers 45°C et l'autre bien plus marquée vers 65-70°C. Dans Gril et al. (1993b) nous avons attribué cette dernière (correspondant à  $\eta_1$ ) à la transition de la lignine. La première ( $\eta_2$ ) peut être attribuée soit aux hémicelluloses, soit à des transitions secondaires de la lignine. Cette interprétation est confirmée par la saturation de la RHT radiale à 60°C : dans cette direction les blocages sont essentiellement postérieurs à la maturation.



**Fig. II-6 : Mise en évidence de températures activant la RHT [Gril et al. (1993b)].**

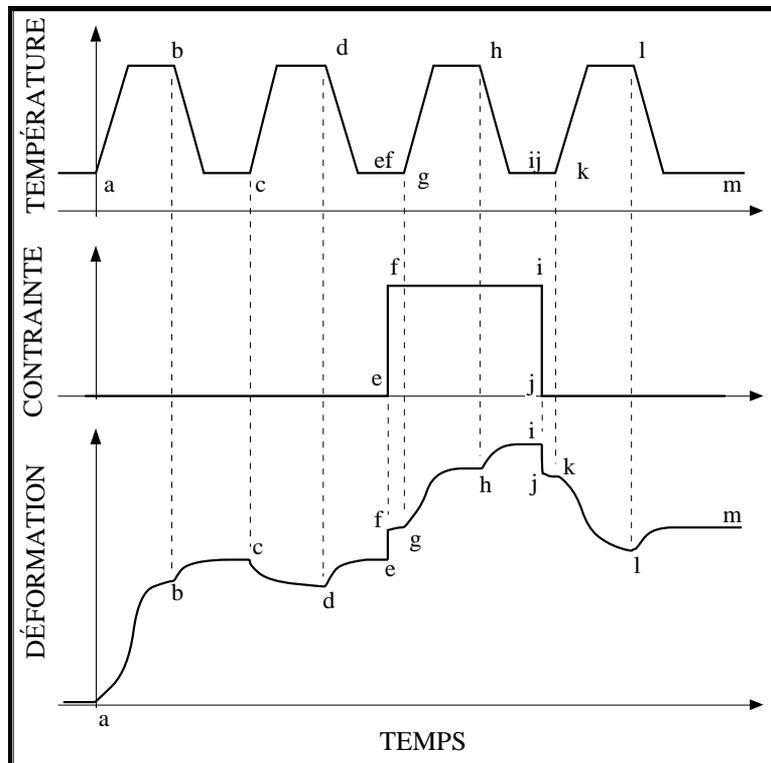
(a) RHT tangentielle et radiale du jujubier (*Ziziphus lotus* (L.) Lam.) induite par des paliers de température croissante ; (b) Déformation d'équilibre en fonction de la température  $\theta$ ; (c) Déformation radiale (R) fonction de la déformation tangentielle (T) ; (d) Recherche des températures d'activation apparente de la RHT par calcul du taux de déformation  $\Delta e/\Delta \theta$ . Dans cette expérience la déformation thermique réversible n'a pas été éliminée.

#### II-1.4. RELATION AVEC LES CONDITIONS MECANQUES DE LA MATURATION

La possibilité d'effectuer cette décomposition fine de la réponse thermique du matériau ouvre des perspectives intéressantes pour l'étude des conditions mécaniques de l'élaboration du bois. Si le comportement viscoélastique du bois mature est connu par ailleurs, on peut déduire de

cette réponse thermique des informations sur le niveau de déformations viscoélastiques bloquées et l'histoire des sollicitations mécaniques qu'il a subi depuis le moment de son élaboration.

Afin d'illustrer nos propos, reprenons la simulation viscoélastique de la croissance de la figure I-8. Elle fournit en particulier l'état des déformations bloquées au moment de l'abattage de l'arbre. Imaginons que le bois de cet arbre est débité peu après et qu'on lui fasse subir un essai de RHT. Selon la position radiale qu'avait ce bois dans la tige, il possède telle ou telle valeur de  $\varepsilon^v$  et  $\varepsilon^w$  au moment de l'essai, d'où une cinétique de RHT différente. Si maintenant nous supposons connus les paramètres du comportement viscoélastique, c'est-à-dire les valeurs de  $U$ ,  $V$ ,  $W$  et la dépendance de  $\tau^v$  et  $\tau^w$  par rapport à la température (au travers d'une loi d'Arrhénius par exemple), on doit pouvoir remonter aux valeurs de  $\varepsilon^v$  et  $\varepsilon^w$ . Pour des lois de comportements plus réalistes mais aussi plus complexes, le calcul inverse peut se révéler malaisé.

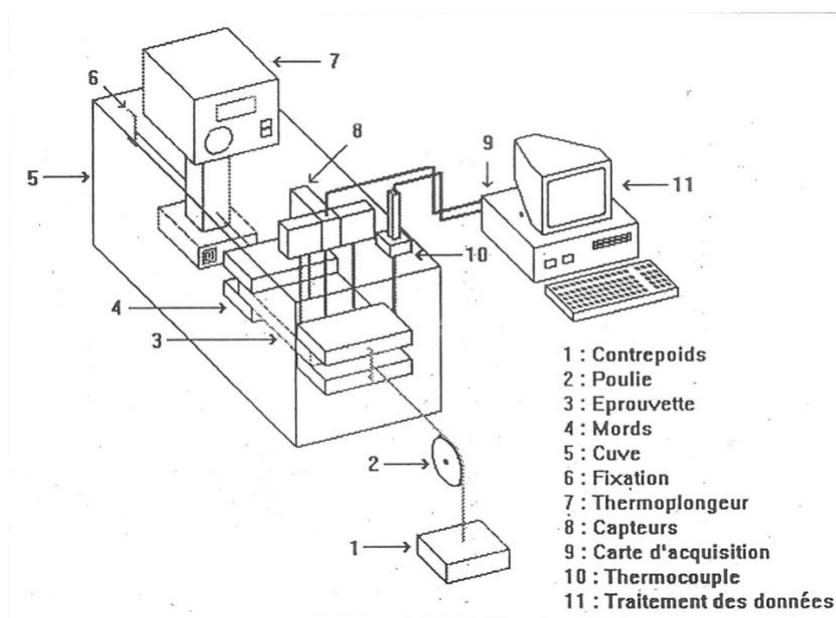


**Fig. II-7 Recouvrance hygrothermique naturelle et provoquée**

Quatre cycles chaud froid sont appliqués à un échantillon de bois maintenu saturé par immersion. (abc) 1er cycle permettant la mesure de la recouvrance hygrothermique (RHT) ; (cde) 2ème cycle permettant de s'assurer que toute la RHT s'est exprimé dans le 1er et de mesurer précisément la déformation thermique réversible ; (ef) mise en charge à froid suivie d'un troisième cycle (ghi) donnant la réponse viscoélastique du matériau tout en provoquant le blocage d'une déformation ; (if) décharge à froid suivie d'un quatrième cycle (klm) mettant en jeu une RHT provoquée.

Cette idée est exploitée par la procédure expérimentale montrée sur la figure II-7 consistant à appliquer quatre cycles chaud-froid. En supposant que le premier était suffisant pour permettre l'expression quasi complète de la RHT, le deuxième se limite alors au terme réversible, de sorte que la soustraction de la déformation des deux premiers cycles donne le terme de RHT  $\eta$ . Le troisième cycle effectué sous contrainte constante simule la mise en place d'un blocage et le

quatrième effectué après décharge, la recouvrance hygrothermique de la déformation ainsi bloquée. Les deux derniers cycles permettent d'obtenir *a posteriori* des informations sur le comportement, celles-ci peuvent alors être utilisées pour interpréter la RHT obtenue à partir des deux premiers. On peut bien sûr envisager des sollicitations plus complexes donnant des informations plus riches, mais dont le principe restera le même. La figure II-8 montre un montage expérimental développé dans cet objectif par Mabile (1994).



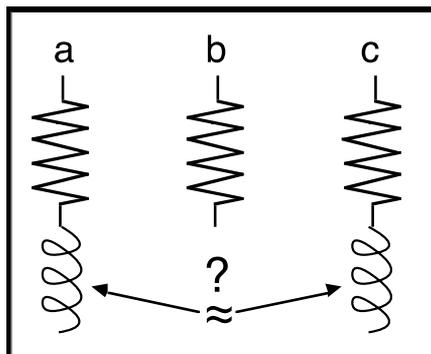
**Fig. II-9 : Mesure de la RHT suivie de l'identification du comportement viscoélastique du bois vert [d'après Mabile (1994)]**

Ce montage expérimental permet d'appliquer le chargement thermomécanique défini dans la figure précédente. L'échantillon (3) baigne dans de l'eau contenue dans une cuve (5) régulée en température au moyen d'un thermoplongeur (7). Des mors (4) permettent d'appliquer une traction au moyen d'un système de câble et poulie. Les déformations sont mesurées dans deux ou trois directions par des capteurs de déplacement (8) reliés à l'éprouvette par de longues aiguilles.

Dans cette approche nous faisons en fait implicitement l'hypothèse que la RHT, si elle est suffisamment poussée, permet de tout débloquent. La question que cela soulève est schématisée sur la figure II-9 : le ressort à spirales du bas représentant le comportement différé (complaisance  $V+W$  du modèle), nous avons admis qu'il est (a) activé pendant la maturation et (b) bloqué (pour  $W$ ) ou tout au moins freiné (pour  $V$ ) dans le bois mature ; si l'on chauffe le bois vert en (c), retrouve-t-on un comportement équivalent à celui de la maturation ? Il s'agit là d'une forte simplification de la réalité, mais qui trouve son fondement dans le rôle joué par la mobilité moléculaire de la lignine dans les deux cas : d'une part pendant la maturation où elle polymérise au milieu d'un réseau semi cristallin déjà en place ; d'autre part lorsque le dépassement de sa transition vitreuse induit un état caoutchoutique.

A partir du moment où l'on admet l'équivalence rhéologique entre chauffage et maturation, on peut pousser un peu plus loin en déduisant de la RHT des informations sur le comportement du bois pendant la maturation. En supposant comme cela a été fait au § I-3.2, que l'action progressive de la maturation est équivalente à celle d'un palier de maturation où le comportement reste constant, et moyennant quelques hypothèses sur la forme de ce comportement équivalent de maturation, nous avons dans Gril (1991), Gril (1992) proposé

d'interpréter la déformation de maturation  $\mu$  comme l'effet d'une pression équivalente de maturation dont les composantes se déduisent de celles de la rigidité du bois, de sa recouvrance instantanée en périphérie et de sa recouvrance hygrothermique. Cette interprétation va dans le sens d'une maturation résultant de la combinaison de deux processus, l'un lié à la lignification activée par la turgescence, l'autre à la contraction du réseau microfibrillaire.



**Fig. II-9 : Relation entre maturation et recouvrance hygrothermique**

(a) élasticité du bois en maturation ; (b) du bois mature ; (c) du bois vert chauffé. On représente ici l'élasticité instantanée par un ressort anguleux et l'élasticité "différée" par un ressort courbe, par référence à des modèles de type ressort en série avec un mécanisme de Kelvin, dont l'amortisseur est bloqué (en b) ou débloqué (en a et b). La question posée par la figure est : y a-t-il correspondance quantitative entre le comportement pendant la maturation, où la lignine est en formation, et pendant le chauffage humide, où la lignine est ramollie ?

## II-2. DECOUPE ET FISSURATION

Ayant recueilli les informations nécessaires sur le comportement du bois, nous allons maintenant aborder la mise en place du volume de bois objet de notre étude thermomécanique. Celui-ci est obtenu à partir de la tige par toute une série de découpes successives. A ces découpes contrôlées, s'ajoutent éventuellement des fissures involontaires qui elles aussi modifient la géométrie et l'état mécanique de la structure.

Qu'il s'agisse d'une découpe volontaire, effectuée dans un but technologique ou expérimental, ou de fissuration, l'apparition d'une surface libre dans un volume de matière précontrainte entraîne une modification de son état mécanique.

En toute rigueur, la découpe devrait être analysée en tenant compte du comportement viscoélastique du matériau. Pour simplifier, nous allons considérer que les découpes successives sont effectuées sur une durée suffisamment courte pour justifier une analyse élastique. Le cas de la fissuration demandera un traitement particulier du fait que la modification de géométrie qu'elle provoque n'est pas connue a priori.

### II-2.1. DECOUPE OPEREE DANS UN MILIEU ELASTIQUE PRECONSTRAINT

D'une manière très générale, une opération de découpe réalisée au travers d'un milieu précontraint peut être schématisée de la manière suivante (figure II-10a). Soit  $V^\circ$  le milieu initial dans lequel règne un champ de contraintes résiduelles  $\sigma^\circ$ ,  $S^\circ$  sa surface extérieure *supposée libre*,  $\Sigma$  une surface interne à  $V^\circ$  destinée à être coupée. On se place dans le cadre des petites perturbations : à  $\sigma^\circ$  peut être associé un champ de déformation élastique  $\varepsilon^\circ$  par l'intermédiaire de la loi de comportement :

$$\sigma^\circ = C \cdot \varepsilon^\circ \quad \text{dans } V^\circ$$

où  $C$  désigne le tenseur des rigidités. L'équilibre statique impose :

$$\text{div } \sigma^\circ = 0 \quad \text{dans } V^\circ$$

et les conditions aux limites s'écrivent

$$\sigma^\circ \cdot \vec{n} = 0 \quad \text{sur } S^\circ$$

où  $\vec{n}$  désigne la normale sortante à  $S^\circ$ , par rapport à  $V^\circ$ . Le long de la future surface de coupe  $\Sigma$  règne un champ de contrainte *a priori* non nul : les valeurs non nulles des vecteurs  $\sigma \cdot \vec{n}$ , où  $\vec{n}$  désigne un vecteur normal à  $\Sigma$ , caractérisent la cohésion de la matière au niveau de  $\Sigma$ , cohésion que la découpe va supprimer. Il faut préciser par ailleurs que le champ de déformation élastique  $\varepsilon^\circ$  n'est pas nécessairement cinématiquement admissible, du fait de la manière progressive dont ont pu s'installer les précontraintes.

Précisons que l'analyse élastique qui va être faite reste valable dans le cas d'un comportement viscoélastique, à condition de considérer la découpe comme instantanée. Autrement dit, les processus visqueux dont les temps caractéristiques sont de l'ordre de la durée de la découpe ne peuvent être pris en compte correctement par cette approche.

La découpe provoquera dans le volume restant  $V$  l'apparition d'un champ de contrainte supplémentaire  $\Delta\sigma$ , tel que la contrainte totale  $\sigma^\circ + \Delta\sigma$  vérifie l'équilibre statique :

$$\text{div } (\sigma^\circ + \Delta\sigma) = 0 \quad \text{dans } V$$

et les conditions aux limites :

$$\begin{aligned} (\sigma^\circ + \Delta\sigma) \cdot \vec{n} &= 0 & \text{sur } S \\ (\sigma^\circ + \Delta\sigma) \cdot \vec{n} &= 0 & \text{sur } \Sigma \end{aligned}$$

où  $S$  désigne la partie de  $S^\circ$  demeurant attachée au volume restant. Appelant  $\Delta\varepsilon$  l'incrément de déformation élastique, on a :

$$(\sigma^\circ + \Delta\sigma) = C (\varepsilon^\circ + \Delta\varepsilon)$$

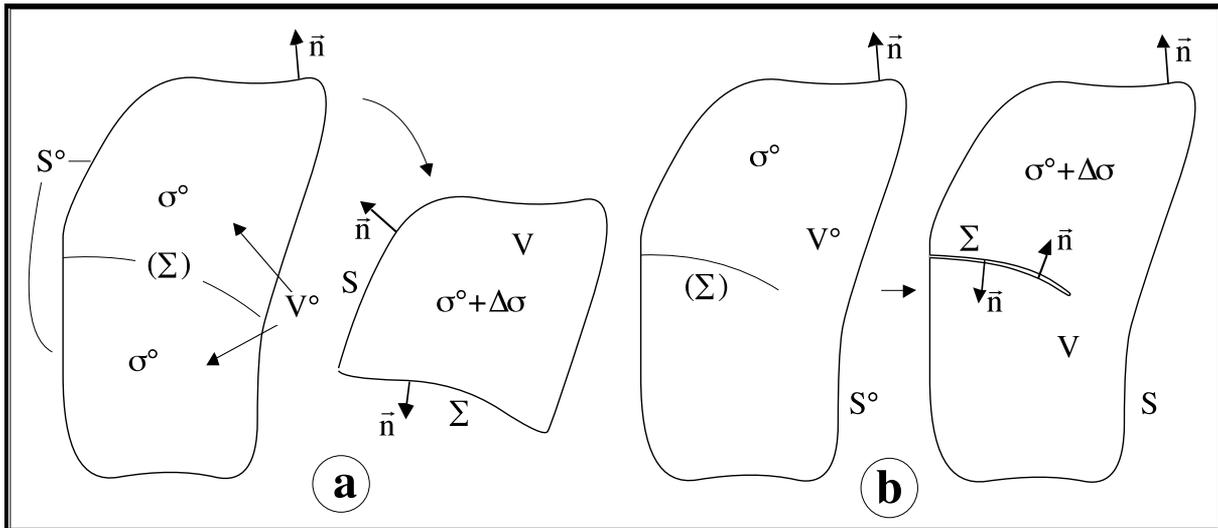
Par différence avec les conditions sur  $\sigma^\circ$ , il est possible de déduire des équations précédentes une série de conditions sur  $\Delta\sigma$ ,  $\Delta\varepsilon$  et un champ de déplacement associé  $\Delta u$  cinématiquement admissible :

$$\begin{array}{ll} \Delta\sigma = C \Delta\varepsilon & \text{dans } V \\ \operatorname{div} \Delta\sigma = 0 & \text{dans } V \\ \Delta\varepsilon = \operatorname{grad}_s(\Delta u) & \text{dans } V \\ \Delta\sigma \cdot \vec{n} = 0 & \text{sur } S \\ \Delta\sigma \cdot \vec{n} = -\sigma^\circ \vec{n} & \text{sur } \Sigma \end{array}$$

La recherche de  $\Delta u$ ,  $\Delta\varepsilon$  et  $\Delta\sigma$  constitue un problème mécanique "bien posé" dans le volume  $V$ , c'est-à-dire qu'il doit posséder une solution unique à un déplacement de corps rigide près.

Il faut signaler que dans la schématisation de certaines situations, on peut être amené à définir une surface de coupe  $\Sigma$  qui ne traverse pas  $V^\circ$  de part en part, de sorte que  $V^\circ$  reste entier et donc  $V$  est confondu avec  $V^\circ$ . C'est le cas d'une entaille. Il convient alors de dédoubler  $\Sigma$  et d'appliquer les conditions aux limites sur les deux lèvres de l'entaille (figure II-10b).

La découpe à l'échelle de la structure s'apparente à l'essai de recouvrance effectué sur le matériau. Ce dernier consiste à annuler la contrainte appliquée au matériau. La découpe, quant à elle, revient à annuler certaines composantes de la contrainte au voisinage de la surface de coupe. A la limite, si la surface en question est suffisante pour annuler toutes les composantes, elle s'identifie à la recouvrance du point de vue du matériau découpé.



**Figure II-10 : Analyse mécanique d'une coupe.**

(a) La surface de coupe sépare le volume initial en deux; (b) Cas d'une entaille ou d'une fissure.

## II-2.2 PRISE EN COMPTE DE LA FISSURATION

Le cas de l'entaille s'applique aussi de manière évidente à une fissure. Les fissures apparaissent souvent aux extrémités des grumes du fait des fortes tensions à cœur, il est opportun d'étudier de quelle manière la modélisation peut les prendre en compte. A la différence des coupes

résultant d'un usinage, les fissures sont imprévues. Il faut donc disposer de critères permettant d'en prévoir la géométrie.

Dans Gril et al. (1993a) nous avons proposé une théorie de la fissuration à cœur basée sur l'analyse du champ de contrainte et la notion de contrainte limite. Cette théorie permet par exemple de constater qu'en certains points d'une bille telle composante de la contrainte de croissance, ou de la contrainte après étuvage, atteint un niveau que le matériau ne peut supporter, et de vérifier que la fissuration la ramène à un niveau acceptable. Elle ne renseigne pas, toutefois, sur la préférence pour tel ou tel mode de fissuration.

Nous allons rappeler très succinctement le cadre classique de mécanique de la rupture dans lequel peut être abordé le problème des fissures. Supposons la fissuration caractérisée par un jeu de paramètres géométriques ( $\phi$ ) correspondant à une surface fissurée  $\Sigma(\phi)$  et un champ de contrainte  $\sigma(\phi)$  calculable selon la méthode décrite plus haut. Nous supposons qu'à l'instant  $t^\circ$  un certain critère de contrainte limite  $L(\sigma) < 0$  est respecté pour le champ  $\sigma$ . Cela peut impliquer une fissuration initiale  $\phi^\circ$  telle que ce critère soit vérifié pour le champ initial  $\sigma^\circ$  correspondant à ( $\phi^\circ$ ).

Supposons qu'à l'instant suivant  $t^\circ + \delta t$  la fissure se soit agrandie, soit du fait d'une variation du chargement ou du comportement du matériau (le critère  $L$  n'est plus respecté), soit par auto propagation. Nous allons examiner la possibilité de cette propagation. Une petite extension de la fissure jusqu'à ( $\phi^\circ + \delta\phi$ ) consommerait une quantité d'énergie  $G\delta\Sigma$  approximativement proportionnelle à la surface fissurée  $\delta\Sigma$ . La constante  $G$  dépend des caractéristiques de cohésion du matériau mais aussi du mode de rupture envisagé. Par ailleurs, notons  $W^e(\sigma)$  l'énergie élastique associée au champ de contrainte  $\sigma$ . La redistribution de contrainte  $\delta\sigma$  consécutive à la propagation  $\delta\phi$  se traduit par une variation d'énergie élastique  $\delta W^e$ . Pour déterminer si l'extension  $\delta\phi$  envisagée est effectivement possible, il suffit d'écrire que d'une part elle doit permettre que le critère  $L$  reste respecté et que d'autre part l'énergie élastique restituée  $W^e(\sigma^\circ) - W^e(\sigma^\circ + \delta\sigma)$  l'emporte sur l'énergie  $G.\delta\Sigma$  consommée dans le processus de fissuration :

$$\begin{aligned} L(\sigma^\circ + \delta\sigma) &< 0 \\ G.\delta\Sigma + \delta W^e &= G.\delta\Sigma + W^e(\sigma^\circ + \delta\sigma) - W^e(\sigma^\circ) < 0 \end{aligned}$$

Lorsque plusieurs directions de propagation remplissent ces deux conditions, on peut prendre comme critère la minimisation du bilan énergétique. Généralement dans le bois, les plans radiaux suivant les alignements cellulaires et tangentiels suivant les bandes de bois initial constituent des surfaces de propagation privilégiées (faible  $G$ ) ce qui simplifie l'exploration.

### II-3. DEVELOPPEMENT D'UNE EXPERIMENTATION SUR DISQUES

Avant d'aborder la thermomécanique d'un billon, nous allons considérer le cas limite d'un billon de faible longueur, une "rondelle". Nous appelons ainsi un disque de bois extrait d'une grume et dont l'épaisseur n'excède guère 10% du diamètre. L'intérêt de l'expérimentation sur rondelle est multiple. Tout d'abord, les transferts de masse et de chaleur y sont rapides du fait des forts coefficients de diffusion dans la direction des fibres, de sorte que la température,

lorsqu'on lui impose de varier, le fait d'une manière à peu près homogène. De plus, dans un tel milieu on peut considérer que les composantes longitudinales de la contrainte sont éliminées et donc que ne s'y exprime que l'effet des contraintes transverses : l'état mécanique dans une rondelle (contraintes planes) est en théorie identique à celui qui règne en bout de grume, tout au moins jusqu'à l'apparition de la fissuration.

### II-3.1. LE CAS ISOTROPE TRANSVERSE (MODELE DE KÜBLER)

La relation entre l'état mécanique dans la tige et dans la rondelle est bien illustrée en partant du modèle de Kübler (1959) pour la description des contraintes dans la tige. On considère le cas d'un tronc parfaitement axisymétrique et cylindrique, constitué d'un bois élastique et isotrope transverse, dont la maturation en périphérie est telle que la contrainte initiale de maturation qu'elle génère est constante. On néglige l'effet des masses. On peut alors montrer que le champ de contrainte de croissance est de la forme :

$$\begin{cases} S_R = \hat{S}_T \ln(r/R) \\ S_T = \hat{S}_T [1 + \ln(r/R)] \\ S_L = \hat{S}_L [1 + 2\ln(r/R)] \\ S_{TL} = S_{RL} = S_{RT} = 0 \end{cases}$$

où  $r/R$  désigne la position radiale relative et  $\hat{S}$  la contrainte initiale de maturation périphérique vérifiant  $\hat{S}_L > 0$  ;  $\hat{S}_T < 0$ . Appelant  $\mu$  la déformation de maturation qui aurait généré  $\hat{S}$  dans le matériau (supposé élastique dans cette approche) on a :

$$\begin{cases} m_L = - \frac{\hat{S}_L - \nu_{LT} \hat{S}_T}{E_L} < 0 \\ m_T = - \frac{\hat{S}_T - \nu_{TL} \hat{S}_L}{E_T} > 0 \end{cases}$$

où  $E_L$  et  $E_T=E_R$  sont les modules d'Young et  $\nu_{LR}=\nu_{LT}$  et  $\nu_{TL}=\nu_{RL}$  les coefficients de Poisson. Supposons maintenant que cette tige soit tronçonnée. On peut montrer qu'à proximité de l'extrémité règne après découpe un champ de contrainte plane proportionnel au champ initial dans la grume :

$$\begin{cases} S_R = E_T m_T \ln(r/R) \\ S_T = E_T m_T [1 + \ln(r/R)] \\ S_{RT} = 0 \end{cases} \quad \text{avec : } E_T m_T = \hat{S}_T + \nu_{TL} \hat{S}_L > \hat{S}_T$$

on voit que le tronçonnage amplifie effectivement l'action du champ initial, en particulier la tension à cœur ( $\sigma_R$  et  $\sigma_T > 0$ ). Ce champ de contrainte est aussi celui qui règne dans une rondelle, extraite par double tronçonnage de la grume.

Le cas isotrope transverse a aussi la propriété remarquable de fournir une solution du même type pour les contraintes induites par un champ de déformation homogène dans le repère cylindrique, de la forme ( $\eta_R=\text{cte}$ ,  $\eta_T=\text{cte}$ ,  $\eta_{RT}=0$ ). Il suffit de remplacer  $\mu_T$  par le déviateur ( $\eta_T - \eta_R$ ). Or, cela s'applique approximativement au cas de la recouvrance hygrothermique du bois

vert avec  $\eta_T > 0$  et  $\eta_R < 0$ , de sorte que le champ total régnant dans une rondelle soumise à étuvage humide devient :

$$\begin{cases} S_R = -E_T m' \ln(r/R) \\ S_T = -E_T m' [1 + \ln(r/R)] \\ S_{RT} = 0 \end{cases} \quad (m' = m_T + h_T - h_R)$$

ce qui met en évidence l'aggravation considérable des risques de fissuration par l'étuvage, le déviateur  $\eta_T - \eta_R$  dominant rapidement la déformation résiduelle élastique  $\mu_T$  lorsque la température s'élève.

On peut pousser plus loin en se demandant quelle opération assurerait la libération complète des contraintes dans la rondelle ? Pour cela il suffit de remarquer que le champ de déformation élastique  $\varepsilon$  associé :

$$\begin{cases} e_R = m' [-n + (1 - n) \ln(r/R)] \\ e_T = m' [1 + (1 - n) \ln(r/R)] \\ e_{RT} = 0 \end{cases}$$

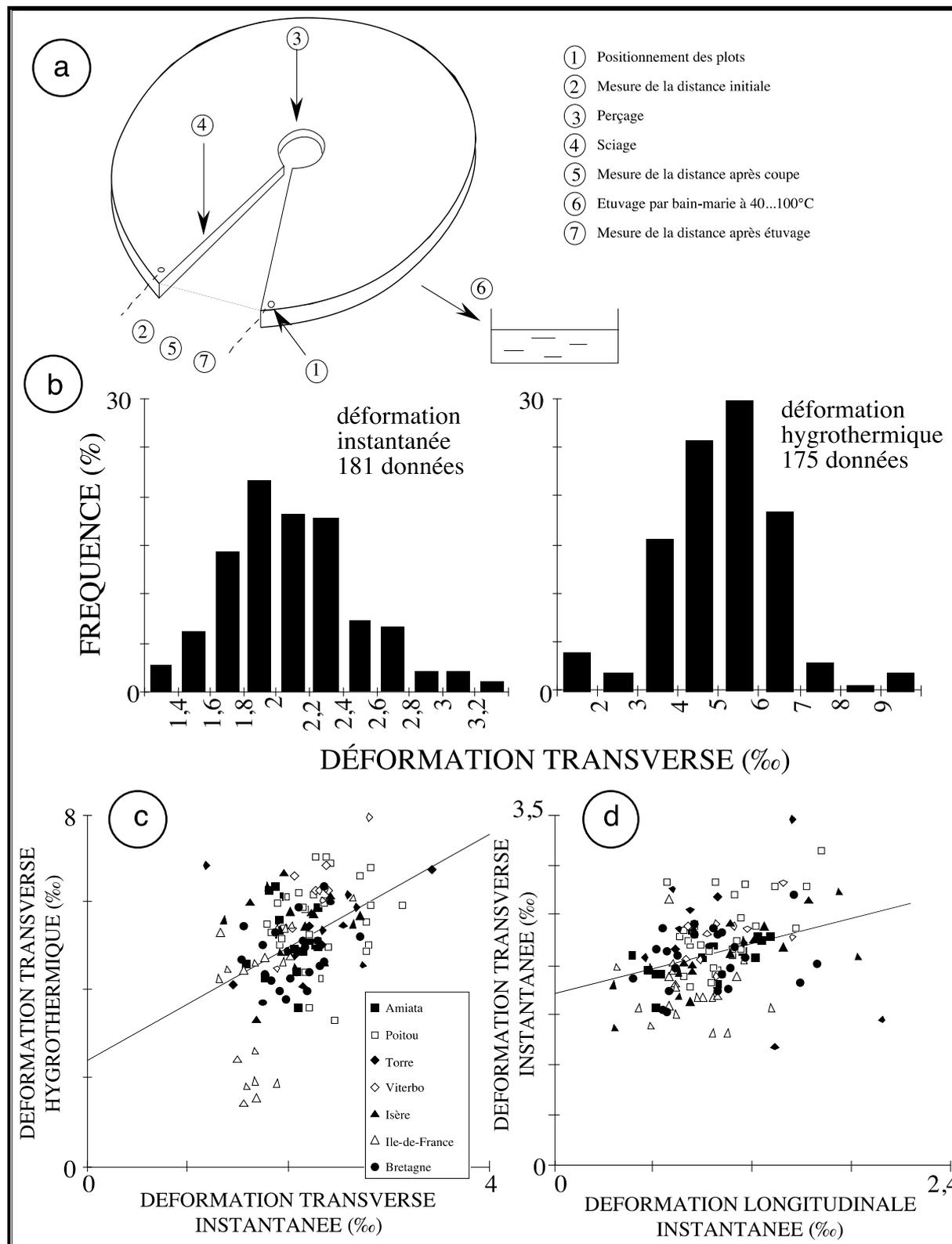
vérifie  $\Delta\varepsilon=0$ , de sorte qu'il existe un champ de déplacement  $u$  tel que  $\varepsilon = \text{grad}_s(u)$ . Une solution, à un déplacement de corps rigide près, est :

$$\begin{cases} u_R(r, \varphi) = m' r [1 - (1 - n_{RT}) \ln(r/R)] \\ u_T(r, \varphi) = m' r \varphi \end{cases}$$

Cette solution, non périodique en  $\theta$ , ne peut avoir lieu dans la rondelle intacte. En revanche elle peut s'exprimer si un secteur  $\theta_0$  en est extrait. La découpe du secteur aura alors pour effet de rapprocher les deux lèvres : en mesurant ce rapprochement au niveau de la périphérie ( $r=R$ ) et en le divisant par l'arc du secteur restant  $(2\pi - \theta_0)R$ , on obtient la grandeur  $\mu'$ , ou simplement  $\mu_T$  s'il n'y a pas eu d'étuvage.

### II-3.2. LA METHODE DE LA FERMETURE

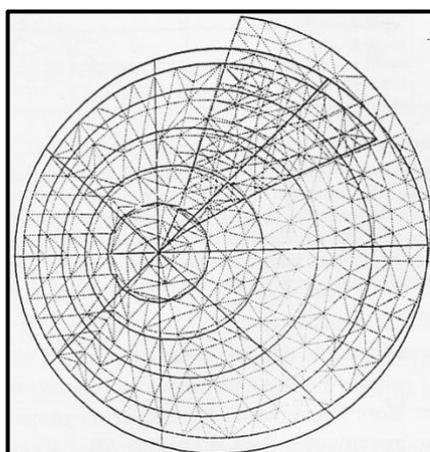
Ces observations ont conduit à développer, dans le cadre de la thèse de JULLIEN, la procédure expérimentale dite de la "fermeture" décrite sur la figure II-11. Elle est basée sur la mesure du rapprochement des deux lèvres d'une saignée radiale et permet d'évaluer non seulement les déformations résiduelles instantanées, mais aussi, par étuvage en bain marie, le potentiel de recouvrance hygrothermique [Jullien (1995), Jullien et Gril (1996)].



**Fig. II-11 : Résultats de mesures par la méthode de la fermeture**

(a) Principe de la méthode (b) histogrammes de mesures instantanées (suite à l'ouverture de la saignée radiale) et hygrothermiques (suite à étuvage en bain marie à 80°C) sur des Châtaigniers Français ou Italiens ; (c) Relation entre mesures instantanées et hygrothermiques ; (d) Relation entre déformations instantanées et déformation résiduelle longitudinale mesurée sur pied par la méthode du trou unique du CIRAD Forêt (moyenne de huit point sur la périphérie à proximité de la zone dont est extraite la rondelle).

La méthode de la fermeture a été imaginée sur la base de l'analyse d'un milieu élastique et isotrope transverse et pour une rondelle axisymétrique. Le bois ne respectant parfaitement aucune de ces hypothèses, il convenait de reprendre l'analyse précédente sur la base d'hypothèses comportementales où géométriques plus proches de la réalité, mais ne permettant pas forcément des développements analytiques. Une partie de ce travail a été effectué par D. JULLIEN, au moyen d'une simulation numérique par élément finis. A partir du calcul du champ initial de contraintes résiduelles dans la rondelle, on peut, appliquant la méthode décrite au chapitre précédent, simuler l'effet de la découpe correspondant à l'extraction du secteur (figure II-12). La simulation a permis d'évaluer la sensibilité de la mesure à des hétérogénéités locales dans certaines zones de la rondelle, ou à des choix expérimentaux tels que l'orientation de la saignée. Elle a démontré l'avantage d'utiliser un facteur correctif tenant compte de la longueur du secteur pour de fortes excentricités, et mis en évidence l'influence différentielle de chaque zone de la rondelle sur la mesure.

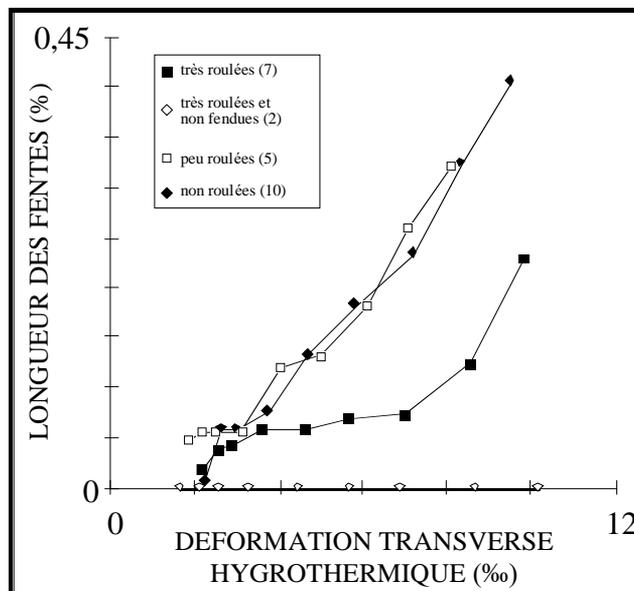


**Fig. II-12 : Modélisation numérique de situations non axisymétriques**

On modélise par éléments finis (code Modulef) la méthode de la fermeture. Un calcul de contraintes initiales a été fait au préalable, en jouant sur la valeur de la déformation de maturation dans chaque secteur du dernier cerne formé. Pour simplifier, la portion de matière enlevée dans l'expérience est assimilée à une simple ligne de coupure radiale (en traits épais), de ce fait le calcul prévoit le recouvrement partiel des deux parties. La forme initiale est indiquée en traits pleins : seules les lignes délimitant les cernes et les secteurs sont montrées. Les traits pointillés correspondent au maillage déformé, moyennant une amplification des déplacements de 100. Le cas montré ici correspond à une croissance de plus en plus excentrée, avec dans chaque cerne des déformations de maturation de 0,1% dans les directions radiales et tangentielles, et une coupe à 45° par rapport au grand axe de la rondelle.

### II-3.3. RELATION AVEC LA FISSURATION D'UNE RONDELLE

En parallèle avec la mesure de la fermeture, on peut étudier le développement de la fissuration à coeur dans des rondelles appariées. Dans le cas d'essences sujettes à roulure comme le Châtaignier, il est intéressant d'observer la compétition entre les deux modes de fissuration à coeur possibles, roulures ou fentes radiales partant du coeur : lorsque s'élève la température d'étuvage, plus le bois tend à produire des roulures, moins il se fend radialement, tandis que le potentiel de déformation transverse reste à peu près le même quel que soit le mode de fissuration [Gril et Jullien (1996)] (figure II-13).

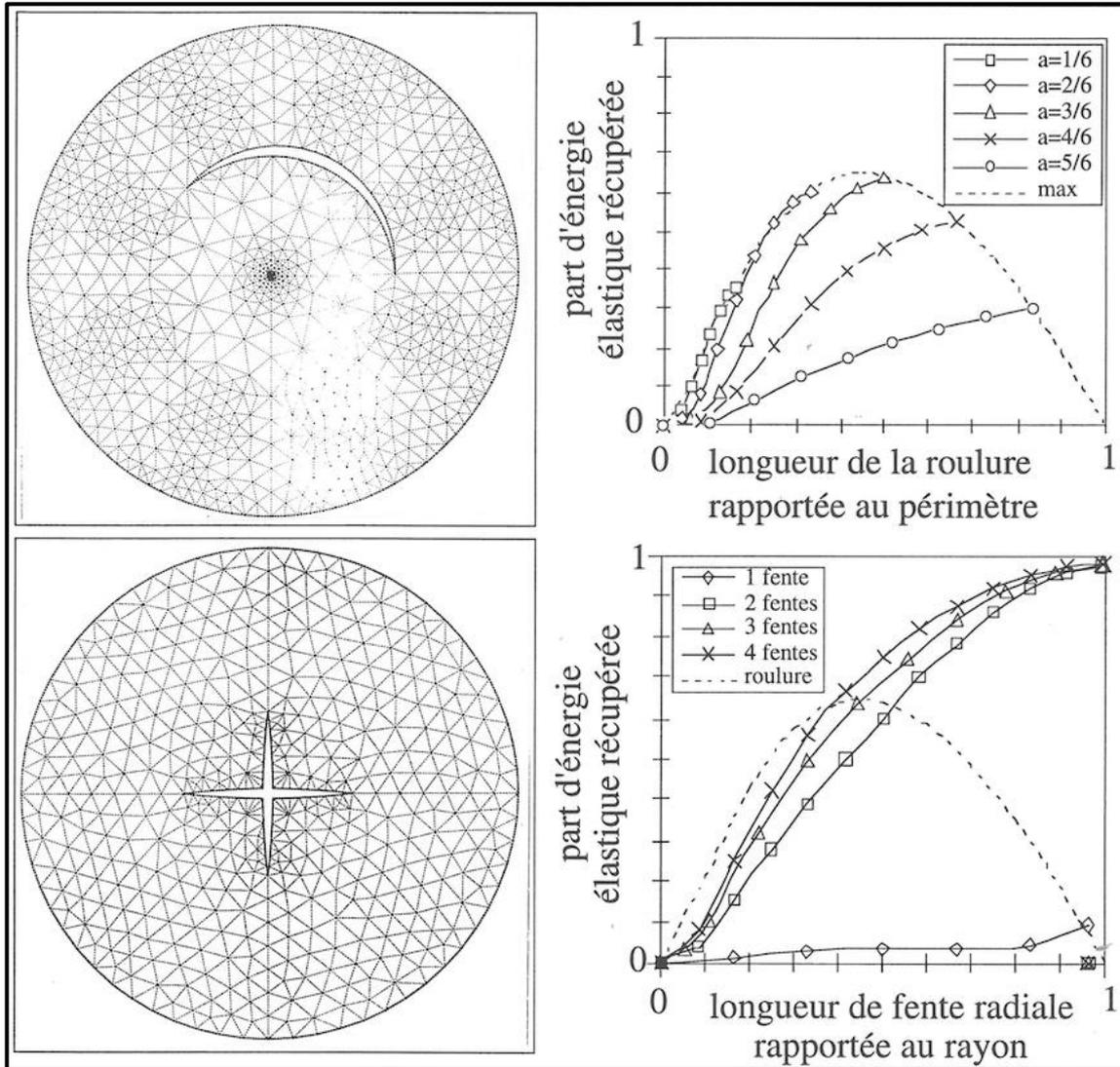


**Fig. II-13 : Relation entre déformations transverses bloquées et tendance à la fissuration.**

La méthode de la “fermeture” décrite plus haut et destinée à mesurer des déformations transverses bloquées dans une rondelle, a été utilisée pour étudier la relation entre le niveau de déformation bloquée dans la rondelle et la tendance à la fissuration de rondelles appariées. La fissuration radiale est quantifiée par la longueur cumulée des fentes rapportée au diamètre. Cette méthode permet de mettre en évidence les températures de déclenchement des phénomènes responsables des fentes en bout de grume et d’apporter un élément d’information utile à l’optimisation des températures d’étuvage à pratiquer en préalable à l’usinage.

En appliquant là aussi la méthode du §II-2.1, il est possible de calculer numériquement les contraintes résiduelles et l’énergie élastique récupérée en fonction de la longueur de la fissure (figure II-14). Appliquant alors l’analyse du §II-2.2, et moyennant les informations sur le comportement du matériau mentionnées dans le chapitre §II-1.1, on devrait pouvoir prédire la fissuration en fonction de la température.

La mesure conjointe de la fissuration et de la déformation transverse sur des rondelles appariées apparaît comme un moyen efficace de mettre en évidence l’activation thermique du risque de fissuration. Son application peut être faite en contexte forestier ou industriel, pour évaluer la qualité de la ressource et optimiser la température et la durée d’étuvage.



**Fig. II-14 : Modélisation numérique de la propagation d'une fissure**

On a modélisé le cas d'une rondelle faite d'un matériau isotrope transverse dans lequel régnait initialement le champ de contraintes résiduelles du modèle de Kübler. A partir d'une simulation par éléments finis (gauche) on obtient la part d'énergie élastique récupérée en fonction de la longueur de la fissure (droite). Cela permet d'en déduire, pour une énergie surfacique de cohésion donnée  $G$ , la longueur critique à partir de laquelle une fissure se propage d'une manière instable, ainsi que, le cas échéant, celle à partir de laquelle elle redevient stable. Haut : roulure se propageant selon un arc de cercle à la position radiale relative  $a/R$ . ; Bas : fentes radiales (1 à 4) partant du coeur. La courbe en pointillés dans les deux figures représente la solution analytique de la roulure totale donnée dans [Gril et Jullien (1996)], dans ce cas l'abscisse correspond à la position radiale de la roulure : on remarque que dans ce cas l'énergie élastique récupérée est maximale pour une roulure située à environ 45% entre la moelle et la périphérie (on fait le bilan d'énergie sur l'ensemble des deux portions restantes).

## II-4. THERMOMECHANIQUE D'UNE PORTION DE GRUME

Dans le chapitre précédent le couplage thermomécanique a été appliqué sous une forme très simplifiée. Une analyse thermoélastique en contraintes planes a suffi pour décrire dans les grandes lignes les processus de déformation ou de fissuration, en se contentant de rendre les paramètres du comportement dépendants de la température. Dans une rondelle il est possible d'admettre l'homogénéité de la température dans le volume, donc de la déformation thermique

si l'on néglige les variations de recouvrance hygrothermique dans le plan transverse. Nous allons maintenant considérer le cas d'une portion de grume d'épaisseur plus conséquente, un "billon", soumise à un environnement hygrothermique donné n'induisant pas de séchage.

### II-3.1. LA DEMARCHE DU PROJET "BILLON"

La démarche suivie est résumée sur la figure II-15. Partant d'un arbre sur pied dans le tronc duquel règne un champ de contrainte  $\sigma^{\circ\circ}$ , on extrait tout d'abord une "grume" de grande longueur (étape 0). Loin des extrémités de cette grume, dans une zone rectiligne et libre de noeuds ou autre source de gradients longitudinaux, règne un champ de contraintes  $\sigma^{\circ}$  qui sera pris comme référence. En vertu du principe de Saint-Venant,  $\sigma^{\circ}$  ne diffère de  $\sigma^{\circ\circ}$  que par l'annulation des efforts dus à la masse de la partie supérieure de l'arbre (houppier) ; dans le cas d'un arbre normalement équilibré, la différence entre  $\sigma^{\circ}$  et  $\sigma^{\circ\circ}$  est faible. Notre étude commence à partir de l'étape (1) : de cette zone centrale de la grume est extrait par double tronçonnage un billon, aboutissant à une nouvelle distribution  $\sigma^{\circ} + \Delta^1\sigma$  des contraintes résiduelles. Une modification supplémentaire de la géométrie peut alors intervenir, soit sous le contrôle de l'opérateur comme par exemple le percement d'un trou à l'une des extrémités, soit par l'apparition incontrôlée de fissuration (étape 2, champ  $\sigma^{\circ} + \Delta^2\sigma$ ). Alors a lieu le chargement thermique du billon (étape 3), aboutissant aux champs  $\sigma^{\circ} + \Delta^3\sigma$  qui évoluent au fur et à mesure du temps et de la modification du champ de température  $\theta$  dans le billon. Enfin au cours de ce chargement thermique peut se produire une progression de la fissuration (étape 4), provoquant des redistributions  $\sigma^{\circ} + \Delta^4\sigma$ .

Contrairement à la rondelle, dans un billon il est indispensable de tenir compte de la diffusion de la température. Cela peut être fait dans un module thermique séparé, en se contentant de tenir compte d'un couplage thermomécanique faible dans lequel le comportement mécanique

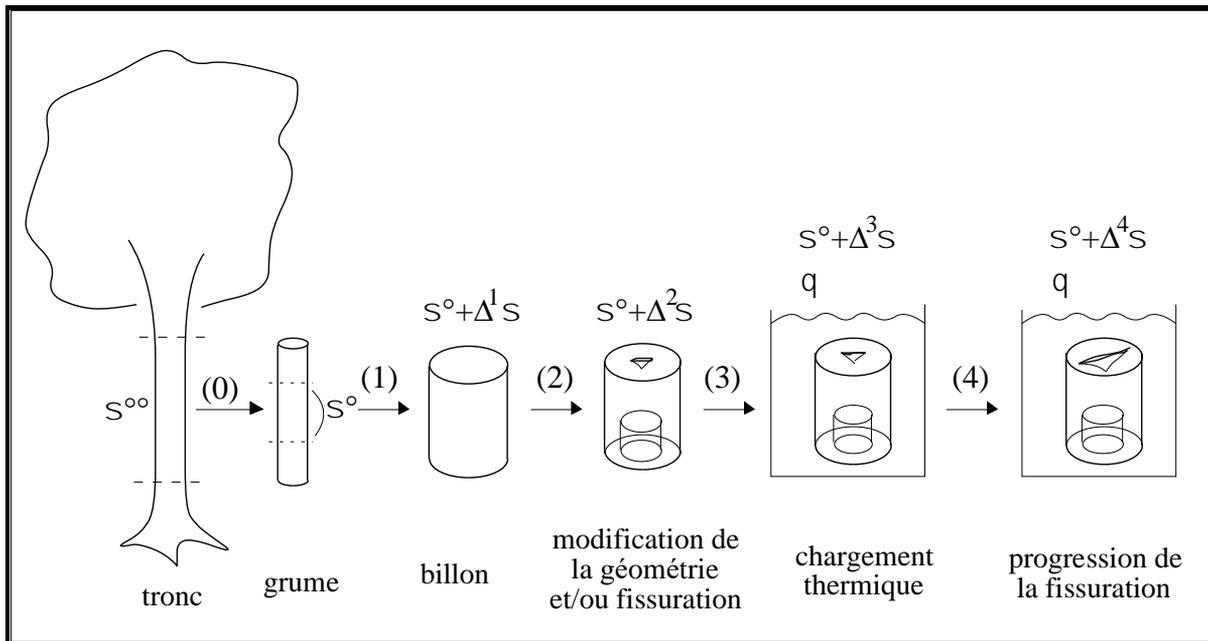


Figure II-15 : Schéma général de l'approche "billon"

dépend de la température, mais où l'influence des sources de chaleur induites par les processus de déformation est supposée négligeable par rapport à la diffusion thermique.

La géométrie initiale et l'état mécanique correspondant (étapes 0 à 2) peuvent être déterminés au moyen des outils présentés dans le § II-2.1. L'étape 3 consiste à résoudre à chaque pas de temps un problème de structure tenant compte des lois de comportement thermoactivées décrites dans le § II-1.1. Si durant l'étuvage la fissuration progresse ou apparaît, c'est de nouveau l'approche du § II-2.2 qui doit être employée.

De 1992 à 1996, ce sujet a fait l'objet d'un programme inter-équipe MRE "Comportement thermomécanique d'une portion de tronc d'arbre. Application à la gélivure et à l'étuvage". Ce projet "billon" était coordonné par nous-même et mené en collaboration avec le Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux, le Laboratoire de Recherche en Science Forestière de l'ENGREF Nancy et l'Équipe de Recherche Qualité du Bois de l'INRA Nancy (Gril et al. 1997). Bien qu'il ait suscité des avancées significatives sur beaucoup de points, il ne saurait être considéré comme achevé, en particulier la prise en compte du comportement viscoélastique dans les approches numériques reste à faire.

### **II-3.2. UTILISATION DES BOIS RONDS : TRAITEMENT EN BOUT DES POTEAUX**

Nous présentons pour finir une application du projet "billon" promis à un développement intéressant. Ce thème a été abordé à l'occasion d'une coopération bilatérale France/Maroc sur les contraintes résiduelles et risques de fissuration à l'extrémité de poteaux d'eucalyptus. D'une manière générale, la valorisation à des fins non papetières des bois de plantation tropicaux constitue un enjeu économique considérable. L'utilisation comme poteau de ligne, en liaison avec les campagnes d'électrification des zones rurales, constitue l'une d'entre elles. Pour l'Eucalyptus elle se heurte encore à des problèmes techniques, liés en particulier à la fissuration due aux contraintes de croissance.

Nous avons vu que la redistribution de contrainte provoquée par le tronçonnage, puis par l'étuvage, ne fait qu'amplifier la tendance initiale des contraintes de croissance à favoriser l'apparition de fentes à coeur au voisinage de la surface de coupe. Divers procédés ont été proposés pour réduire ce risque, jouant soit sur un renforcement de la résistance transverse (crochets en S insérés sur le trajet des fentes...), soit sur la distribution de contrainte sans modification de la forme du débit (cerclages maintenant la section en compression par exemple), soit sur la géométrie [Kübler et Chen (1975)].

Nous nous intéressons plus particulièrement au dernier type de solution, notamment celle qui consiste à faire suivre le tronçonnage d'un débit modifiant le profil de la section. Parmi les découpes envisageables, le forage d'un trou central à l'extrémité de la grume nous a semblé particulièrement intéressant en vue d'utilisations des grumes en poteaux, par les possibilités qu'il offre pour l'ancrage au sol et la facilitation du traitement de préservation d'essences difficilement imprégnable à coeur (c'est le cas de l'Eucalyptus). Une autre application de ce procédé est l'entraînement en rotation pour le déroulage de petits bois basé sur l'utilisation d'un pignon central, inséré en force aux extrémités de la bille après forage d'un avant-trou.

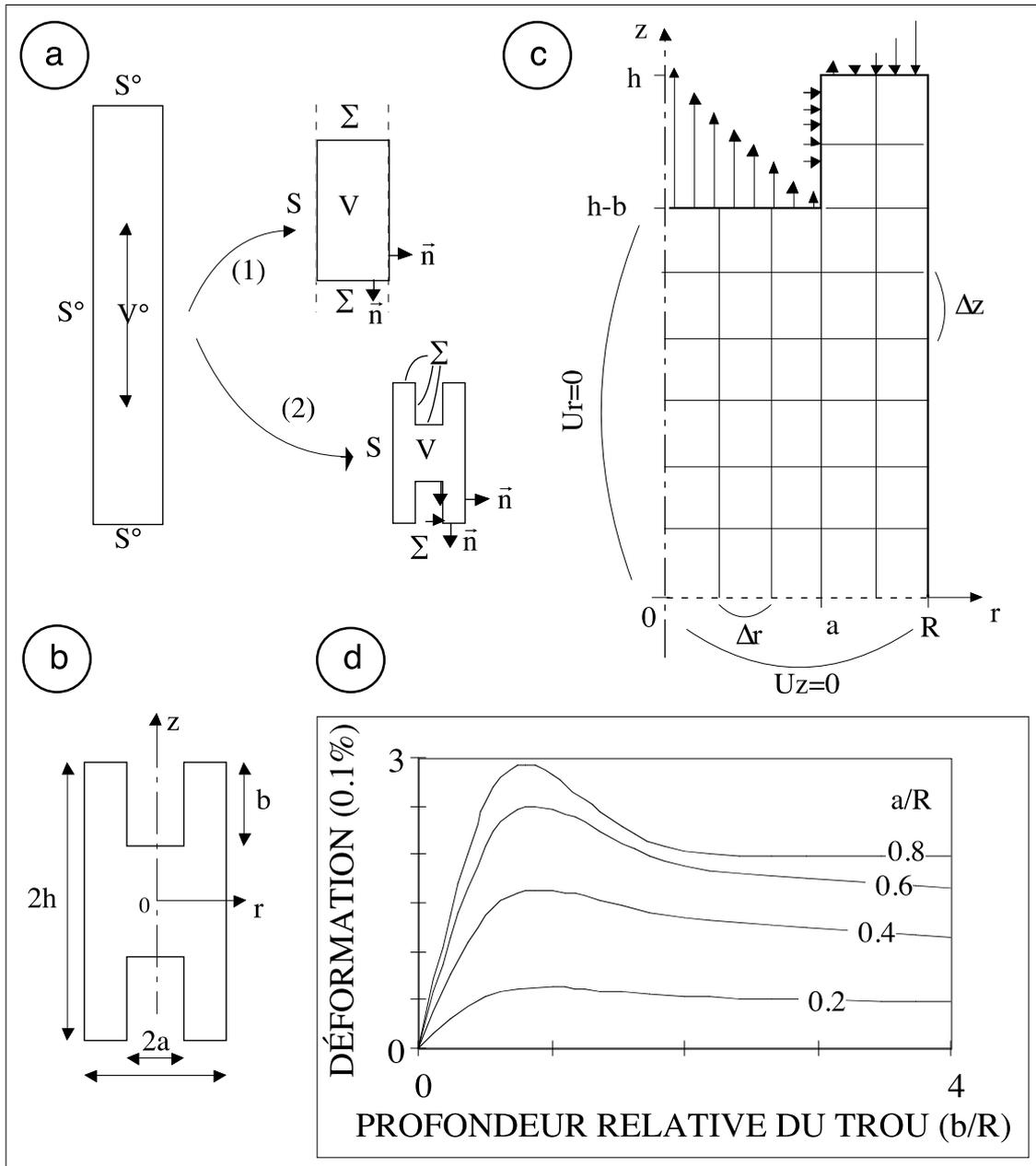


Fig. II-16 : Simulation du perçage en bout d'un billon

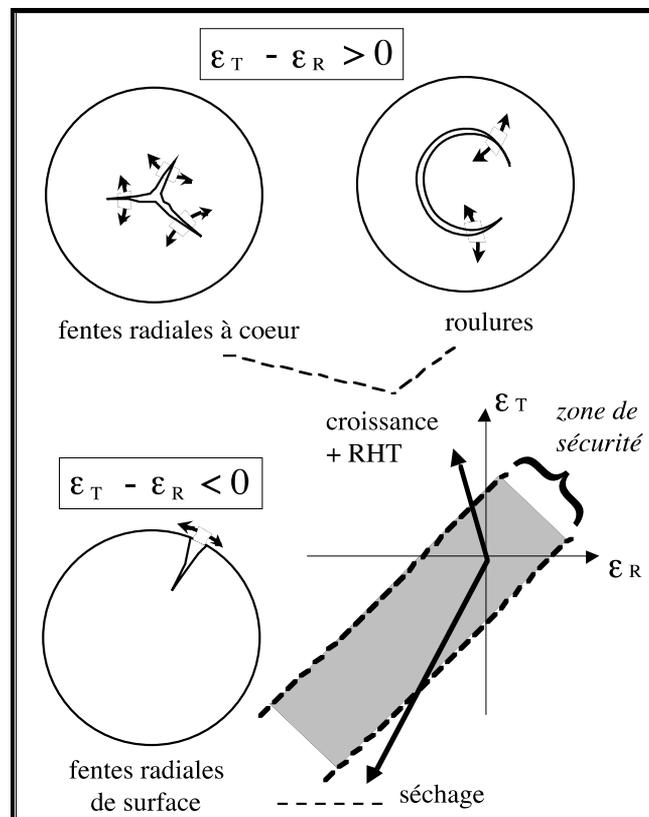
(a) Schématisation des opérations de coupe : l'effet du perçage est représenté comme la différence entre les deux opérations (1) et (2) effectuée à partir de la grume dont l'état mécanique est supposé connu (profils linéaires de contraintes résiduelles) ; (b) Paramétrisation géométrique ; (c) maillage et conditions aux limites ; (d) Simulation de la déformation tangentielle à l'extrémité induite par le perçage, en fonction du rayon et de la profondeur du trou.

Une double approche, expérimentale et numérique, a été tentée. La démarche a été la suivante : à partir de mesures en périphérie de l'arbre sur pied puis sur rondelles, on peut évaluer les champs de contraintes résiduelles et de déformations bloquées présents initialement dans la tige. On prédit alors par le calcul numérique les déformations en périphérie induites par le perçage de diamètre ou profondeur croissants, puis par l'étuvage (figure II-16). Ces prédictions peuvent alors être comparées aux mesures de déplacements relatifs de plots fixés en périphérie du billon. Malgré une prise de données incomplètes, notamment pour les rigidités qui n'ont pas

été mesurées directement sur le bois étudié, la confrontation de la théorie avec l'expérience s'est révélée très satisfaisante.

### II-3.3. ÉTUVAGE ET SECHAGE

Comme cela est rappelé sur la figure II-17, étuvage humide et séchage ont des actions contradictoires sur la fissuration des grumes. Cela s'explique très simplement par le signe du déviateur  $\epsilon_R - \epsilon_T$  de la déformation induite par le processus : pour la recouvrance hygrothermique du bois vert il est négatif d'où des contraintes de traction à coeur, alors qu'avec le séchage il est positif d'où de la traction tangentielle en périphérie. Cela suggère, pour des applications où les bois ronds vont être utilisés comme tels, donc devront être séchés (poteaux de ligne, piquets, jeux d'enfants ou parois de chalets, etc.) de combiner la recouvrance hygrothermique avec le début du séchage, de manière à éviter la fissuration à coeur d'une part, et réduire l'ampleur de la fissuration périphérique d'autre part.

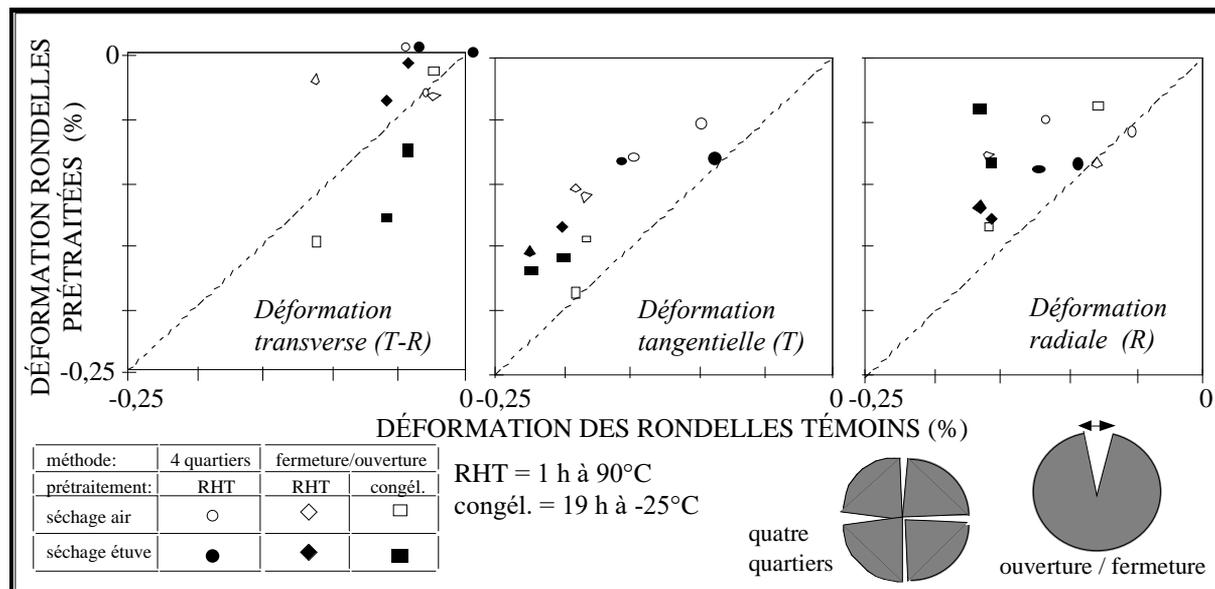


**Fig. II-17 : Risques de fissuration associés à l'anisotropie transverse de la déformation induite.**

La "zone de sécurité" correspondant à une quasi isotropie peut être franchie soit vers le haut (type étuvage: fentes en étoile ou roulure), soit vers le bas (type séchage: fentes radiales partant de la périphérie).

Appliquant ce principe à l'Eucalyptus, connu pour poser des problèmes au séchage du fait du collapse, nous avons obtenu des résultats spectaculaires. L'étuvage ou la congélation ont été testés comme prétraitement préalable au séchage de rondelles. La figure II-18 montre que si ces deux traitements diminuent les retraits, ils le font de manières très différentes : la congélation amplifie le déviateur  $\epsilon_R - \epsilon_T$  et donc le risque de fissuration alors que l'étuvage réduit

l'un et l'autre. Cela a été confirmé par l'observation de la fissuration sur rondelles entières appariées.



**Figure II-18 : Effet d'un prétraitement thermique sur le retrait de séchage**

Deux prétraitements thermiques ont été appliqués sur des rondelles avant séchage : congélation à -25°C pendant 19h et bain à 90°C pendant 1 heure. Des groupes de 2 ou 3 rondelles ont été utilisés : non traitée, chauffée, une éventuellement congelée. Outre la méthode de fermeture/ouverture décrite au §II-3, un essai basé sur le débit de la rondelle en 4 quartiers a été effectué pour estimer les déformations. Le séchage est fait soit directement dans une chambre contrôlée à 65% HR et 20°C, soit après passage préalable à l'étuve à 103°C pendant 24h. La déformation transverse ( $\varphi$ ) provient directement de la mesure de la fermeture et la déformation tangentielle ( $\varepsilon_T$ ) de la variation relative du périmètre; la déformation radiale, en revanche, est une estimation indirecte obtenue par différence entre  $\varepsilon_T$  et  $\varphi$  en faisant l'hypothèse que  $\varphi \approx \varepsilon_T - \varepsilon_R$ .

## **CONCLUSION DE LA PARTIE II**

*Nous avons étudié dans cette partie certaines des conséquences technologiques de l'existence de blocages biomécaniques. Le fil conducteur était le projet "billon" pour lequel il a fallu accumuler un grand nombre de données sur le comportement, mettre au point des méthodes expérimentales nouvelles et développer des outils numériques. Nous sommes en fait au début d'un projet ambitieux visant à pouvoir simuler le traitement des bois ronds, soit en vue de les préparer à d'autres étapes de la transformation, telles que le déroulage ou le sciage, soit de les utiliser tels quels comme éléments de structure.*

*L'utilisation de rondelles pour caractériser un risque de fissuration ou l'effet de traitements semble prometteur du fait de la plus grande facilité opératoire à travailler sur rondelles. Toutefois, les conditions mécaniques régnant dans la rondelle et à l'extrémité du billon diffèrent à partir du moment où commence la fissuration. La relation entre les deux ne peut être abordée sans procéder à un calcul de structure.*

*Nous avons aussi évoqué l'étude des procédés de coupe eux mêmes, pour lesquels l'influence de la température sur les divers aspects du comportement intervient aussi de manière cruciale. Le problème mécanique que constitue le tranchage ou le déroulage présente certaines analogies avec celui de la propagation d'une fente d'étuvage. Dans l'usinage d'un placage la propagation de la fente constitue l'objet même du procédé et c'est son contrôle que doit permettre le réglage des outils.*

*A partir du séchage apparaissent d'autres effets qui occultent ceux que nous observons dans le bois vert. Mais si les retraits sont effectivement dominants en termes quantitatifs, il ne faut pas sous-estimer l'importance des blocages biomécaniques, car ils déterminent l'état initial du matériau et donc sont susceptibles d'influencer le comportement du bois même séché. Une illustration en a été donnée à propos du séchage de l'Eucalyptus, fortement influencé par le traitement thermique à l'état vert.*

*La mention du séchage nous amène au thème de la troisième partie, consacrée principalement aux effets des mouvements d'eau dans le bois "matériau".*

## Troisième partie

# COUPLAGES ET BLOCAGES DANS LE BOIS, MATERIAU DE L'INGENIEUR

Après avoir exploré les conditions d'élaboration du bois dans l'arbre et les conséquences du débit pour le bois vert, nous allons passer au bois matériau technologique. Celui-ci se distingue du bois vert par le fait qu'il a perdu par séchage une partie de son eau liée, de manière à être en équilibre hygrosopique avec l'ambiance dans laquelle il est utilisé.

Qu'il s'agisse du séchage lui-même ou de l'utilisation ultérieure, les variations d'humidité du bois ont une action déterminante sur le comportement rhéologique du bois, du fait de l'existence d'un couplage hygromécanique ou mécanosorptif. En effet, l'action de l'eau ne se limite pas à influencer, au même titre que la température, les paramètres du comportement. La sorption (adsorption/désorption) produit un effet supplémentaire qui parfois éclipse tous les autres mécanismes de déformation. Le blocage d'une forte compression, dans l'exemple de l'introduction, en constituait un exemple spectaculaire.

La flèche de Cupidon nous a montré aussi que le couplage mécanosorptif ne se limite pas à augmenter la mobilité moléculaire. Il suscite l'apparition de mécanismes de déformation nouveaux, illustrés ici par le fait que l'écrasement de la structure cellulaire chaude et humide se fait par la flexion des parois. Si le bois avait été sec, cet écrasement se serait traduit par de nombreuses ruptures des parois cellulaires. Nous allons voir que cette ambivalence de l'effet mécanosorptif se retrouve dans sa modélisation.

Ce sujet est dans la continuité directe de la thèse [Gril (1988)], qui contenait trois volets principaux : une étude expérimentale de l'effet mécanosorptif ; sa modélisation ; une tentative de passage micro-macro. Commencée au Laboratoire de Mécanique des Solides de l'École Polytechnique (dir. P. HABIB) mais poursuivie au Laboratoire de Physique du Bois de l'Institut de Recherche sur le Bois, Université de Kyoto (dir. T. YAMADA), elle a été élaborée à partir de trois collaborations :

- avec le Pr. Ingo MÜLLER pour la modélisation moléculaire du couplage mécanosorptif, inspirée de ses travaux sur les alliages à mémoire de forme ;
- avec le Dr. David HUNT dont les travaux expérimentaux sur l'effet mécanosorptif commençaient à faire autorité ;
- avec le Pr. Misato NORIMOTO spécialiste, entre autres, des passages micro-macro dans le bois.

Les deux dernières, directement ou par l'intermédiaire d'étudiants, continuent actuellement. Ces trois aspects ont donné lieu à des développements ultérieurs, qui vont être présentés dans cette partie après une discussion introductive sur la prise en compte des paramètres de structure dans l'étude du comportement du bois.

### III-1. ECHELLES D'OBSERVATION ET PASSAGES MICRO-MACRO

Dans les parties précédentes nous n'avons eu qu'occasionnellement à faire référence aux échelles microscopiques. Cela tenait principalement au fait que nous traitons de problèmes concernant des portions de tiges ou de grumes, pour lesquels l'échelle pertinente est macroscopique. Dans cette partie, nous allons approfondir l'étude de ce comportement du bois "matériau de l'ingénieur", ce qui va nous amener à faire souvent référence à des échelles inférieures pour en expliquer les particularités. En effet, la très forte anisotropie et l'hétérogénéité du matériau, jointes à sa variabilité due à l'origine biologique, rendent inévitable la prise en compte des paramètres structurels, surtout si l'on cherche des explications aux phénomènes observés à l'échelle macroscopique. Aussi allons-nous commencer par rappeler les bases de ces passages dits "micro-macro" entre les divers niveaux d'observation.

Signalons à ce propos que le LMGC est impliqué depuis 1997 dans un projet DERF, intitulé "effets de la composition chimique, de l'ultra-structure et de la structure anatomique sur quelques propriétés de base du matériau bois", coordonné par P. Perré de l'ENGREF Nancy. Ce projet propose d'associer les observations, mesures et modélisations à plusieurs échelles de façon à comprendre les mécanismes d'élaboration des propriétés macroscopiques du bois, afin de mieux agir tant au niveau de la production de la matière ligneuse que de son utilisation.

#### III-1.1. LES PASSAGES MICRO-MACRO DANS LES BOIS

La microstructure du bois montre une grande complexité mais aussi un niveau d'organisation élevé. A partir d'une matière constitutive et des organisations pariétales similaires dans tous les bois, on observe une variété considérable des plans ligneux ou organisations cellulaires caractéristiques des espèces, pour retrouver une forte unité de la structure macroscopique (les bois sont tous plus ou moins orthotropes cylindriques). De ce fait, la recherche d'explications structurelles au comportement macroscopique doit partir a priori de la matière lignocellulosique qui constitue le dénominateur commun des bois. Il s'ensuit alors toute une série de passages micro-macro qui peuvent tirer parti des particularités de tel ou tel type d'espèce. Reprenons toutes ces étapes en partant de l'échelle moléculaire (figure III-1) :

##### Les constituants moléculaires

- Cinq types moléculaires constituent la base de la matière commune à tous les bois : cellulose, hémicelluloses, lignines, pectines, eau, extractibles éventuels. La cellulose est un polymère de glucose qui tend à constituer, pour moitié de son volume environ, des zones cristallines hydrophobes faisant de longs filaments appelés microfibrilles. La section d'une microfibrille a typiquement la forme d'un carré de 3 nm de côté correspondant à une cinquantaine de chaînes celluloses. Pour certains la cellulose amorphe est pour l'essentiel localisée sur le pourtour des microfibrilles [Norimoto et Takabe (1985)], alors que d'autres la localisent aussi dans des zones de faiblesse situées périodiquement le long des microfibrilles [Salmen et al. (1985)]. Les microfibrilles constituent un réseau rendu probablement continu par des liaisons latérales, tandis que la cellulose amorphe et les autres molécules constituent une matrice hygroscopique comblant les interstices du réseau. En se basant sur la configuration atomique de la cellulose cristalline on peut en théorie en déduire ses propriétés mécaniques [Mark (1967)] tandis que la complexité de la matrice nous interdit de lui appliquer de telles approches. On sait toutefois attribuer des différences de comportement entre essences à tel ou tel composant, par exemple les différences de transitions vitreuses entre résineux et feuillus par les proportions de types de lignine.

## Matière ligno-cellulosique

- L'ensemble réseau+matrice constitue un matériau appelé "matière lignocellulosique". Bien souvent le premier passage micro-macro est effectué en supposant la connaissance des propriétés des microfibrilles cristallines d'un côté et de la matrice amorphe et hygroscopique de l'autre, ainsi qu'une certaine périodicité du réseau microfibrillaire et des incrustations de matrice. Mark (1972) et Norimoto et al. (1986) proposent une homogénéisation 2D qui est en fait un double calcul multicouche 1D : on calcule d'abord le comportement d'une couche faite de microfibrilles et de matrice sans se préoccuper des contraintes subies dans le sens de l'épaisseur, ensuite on calcule le multicouche fait de couches de matrice en alternance avec ce matériau homogénéisé. Il est possible de prendre en compte une distribution normale des angles de microfibrilles [Cave (1968)], ainsi

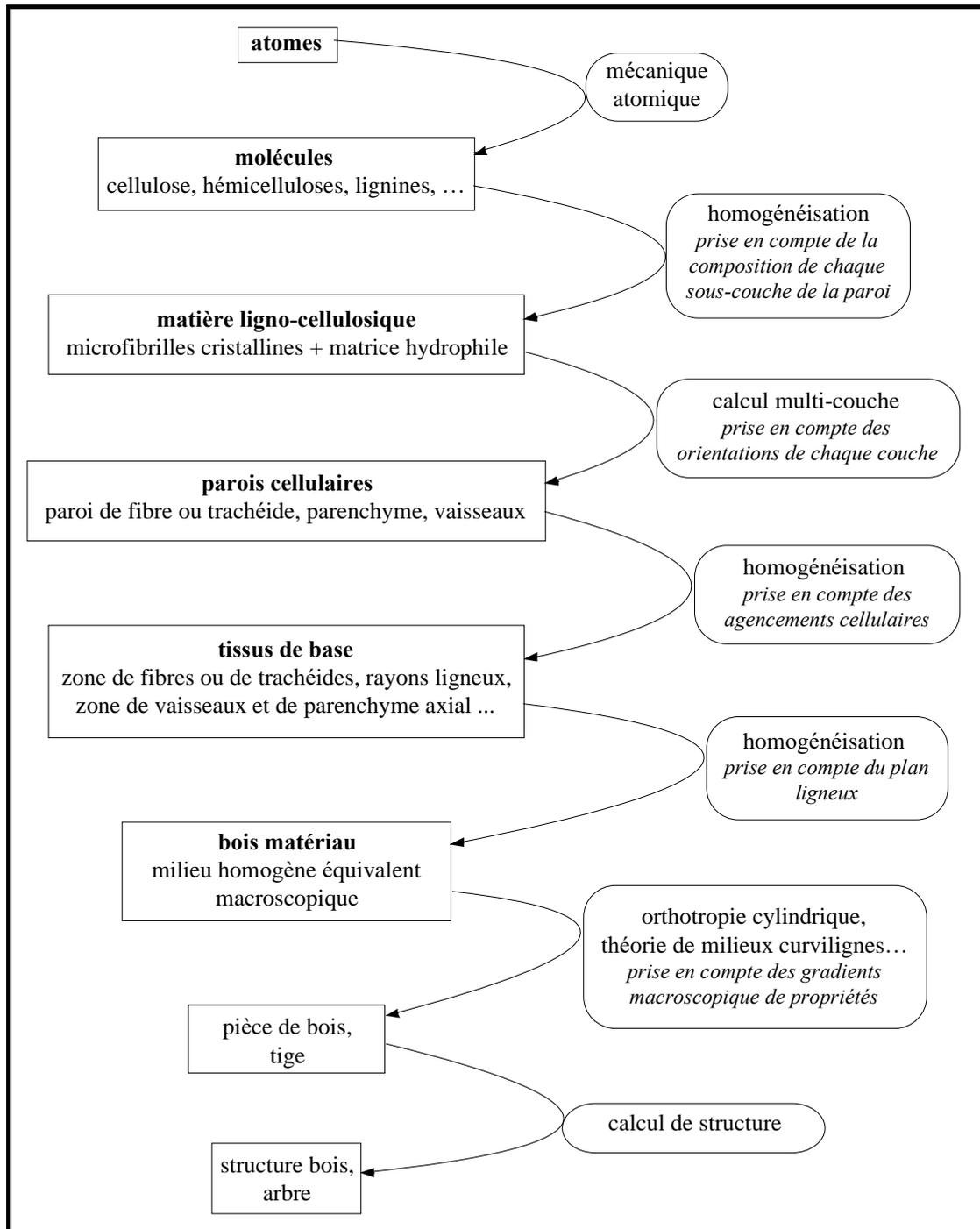


Fig. III-1 : Échelles et passages micro-macro

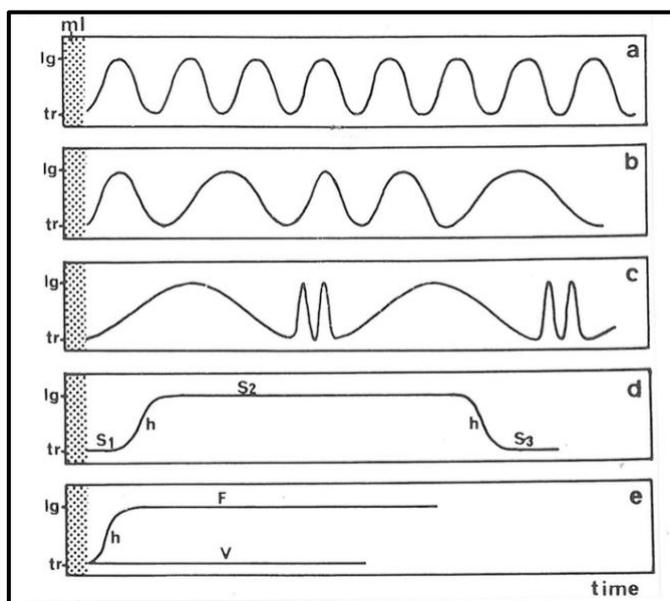
que la “restriction de cisaillement” due à la structure antisymétrique de la double paroi [Schniewind (1972)]. Salmen et de Ruvo (1985) proposent un modèle basé sur une théorie d'inclusions de fibres dans une matrice. Dans Gril (1988) nous avons repris l'approche de Norimoto en remplaçant le premier passage multicouche par une représentation du réseau microfibrillaire comme réseau périodique de poutres, notre intention étant de mieux représenter les liaisons latérales entre microfibrilles.

### La paroi

- Dans la paroi primaire (P) qui constitue la fine enveloppe externe des cellules, les microfibrilles sont désordonnées mais dans les couches de la paroi secondaire (S) leur orientation est fortement organisée avec un angle des microfibrilles approximativement constant dans une couche donnée, mais susceptible de varier dans l'épaisseur de la paroi. Il en résulte un schéma hélicoïdal variable d'un type cellulaire à l'autre. Ainsi dans le parenchyme l'angle varie cycliquement le long de l'épaisseur [Roland et al. (1987)], alors que dans les fibres ou trachéides qui sont majoritaires et jouent le rôle mécanique principal, il varie selon des paliers qui déterminent des sous-couches S1, S2 et S3 (figure III-2). Dans la couche S2 la plus épaisse l'angle peut aller jusqu'à 45° mais est généralement inférieur à 20°, ce qui contribue fortement à l'anisotropie du bois. Pour un bois donné, la valeur moyenne de l'angle des microfibrilles par rapport à la direction des fibres dans un volume de bois donné, est un paramètre important de son comportement macroscopique.

### Les cellules et tissus de base

- Connaissant le comportement homogénéisé de la matière lignocellulosique d'une part, l'organisation pariétale avec la géométrie et l'orientation des couches d'autre part, on peut en principe, par un calcul de structure, déduire le comportement d'une cellule toute entière, ou d'un groupe de cellules identiques. Cela peut être fait au moyen d'une homogénéisation 2D tirant parti



**Fig. III-2 : Expression hélicoïdale de l'ultrastructure pariétale de quelques types cellulaires d'après Roland et al. (1987)**

L'organisation pariétale observée dans les fibres ou trachéides, les cellules prédominantes du bois, ne représente qu'un mode particulier parmi d'autres dans les cellules végétales : (a) cas des cellules d'épiderme ou de parenchymes, avec des variations périodiques régulières et complètes de l'angle microfibrillaire, entre un orientation longitudinale (lg) et transverse (tr) à l'axe de la cellule ; (b) irrégularités dans le collenchyme et certains sclérenchymes) ; (c) fonctionnement bimodal chez certains scléréides ; (d) mode figé typique des fibres ou trachéides, avec couches S1, S2 et S3 et des zones de transition h ; (e) blocage de la variation dans certaines fibres dépourvues de couches S3 (F) ou dans de nombreux vaisseaux (V) ; ml : lamelle moyenne.

de la forme généralement très allongée des cellules, quitte à considérer séparément l'effet perturbateur des jonctions des cellules à leurs extrémités. Lorsqu'il s'agit de cellules aux parois fines on peut même remplacer cette étape 2D par deux étapes 1D : tout d'abord on calcule le comportement de la plaque que constitue la double paroi de deux cellules adjacentes ; ensuite par un calcul de Résistance des Matériaux on calcule le comportement du milieu cellulaire périodique selon la méthode décrite par Gibson et Ashby (1988) pour les nids d'abeille. Nous proposons de traiter selon la même procédure les rayons ligneux, en les considérant comme des assemblages périodiques de cellules de parenchyme radial. A ce niveau le cas des vaisseaux peut nécessiter un traitement à part, leur paroi étant souvent percée de nombreuses ponctuations que l'on ne peut négliger comme pour les fibres ou les trachéides. De plus les vaisseaux sont souvent entourés de cellules particulières comme du parenchyme axial, dont la contribution doit être prise en compte pour aboutir à un comportement équivalent "paroi de vaisseau".

### Prise en compte du plan ligneux

- Disposant des comportements homogènes équivalents des tissus de base (fibre/trachéide, rayon ligneux, paroi de vaisseau), il reste à les assembler. Cela est particulièrement simple chez les résineux si l'on néglige la contribution (a priori faible) des rayons ligneux : le gradient radial intra-cerne peut être alors pris en compte par une simple homogénéisation multicouche 1D. Chez les feuillus nous proposons de passer par des étapes intermédiaires 2D en décrivant les tissus comme des vaisseaux inclus dans le tissu homogénéisé "fibre", puis des rayons inclus dans ce milieu homogénéisé "fibre+vaisseaux". Dans le cas de feuillus homogènes, sans zone initiale poreuse ni gros rayons ligneux, ce tissu équivalent "fibre+vaisseau+rayon" peut alors être traité de manière équivalente au tissu "trachéide" pour la prise en compte de gradients intra-cerne. Dans le cas des feuillus à zone initiale poreuse, cela nécessite une approche 2D dans laquelle les gros vaisseaux du bois initial sont inclus dans le milieu homogénéisé "fibre+vaisseau+rayon" correspondant au bois final. S'il y a en plus de gros rayons ligneux, il est difficile d'éviter l'homogénéisation périodique 3D avec inclusion des gros rayons et gros vaisseaux dans le milieu "fibre+vaisseau+rayon". Nous n'avons pas évoqué les bandes de parenchyme, canaux de résine, structures étagées, ou autres particularités spécifiques du plan ligneux : cela se traite au cas par cas, en s'efforçant de s'efforçant à respecter le principe de multiplier les passages pour les simplifier.

### Le matériau bois

- On obtient ainsi le comportement homogène équivalent d'un bois fait de la juxtaposition périodique de cernes identiques. Ce comportement est orthotrope dans le repère local (R,T,L) dans la mesure où les plans radial RL et transverse RT constituent des symétries matérielles. Cela est généralement le cas, mais peut être mis en défaut par exemple pour certains plans ligneux montrant des déviations systématique de vaisseaux dans le bois final. A l'échelle d'une tige ou d'une pièce

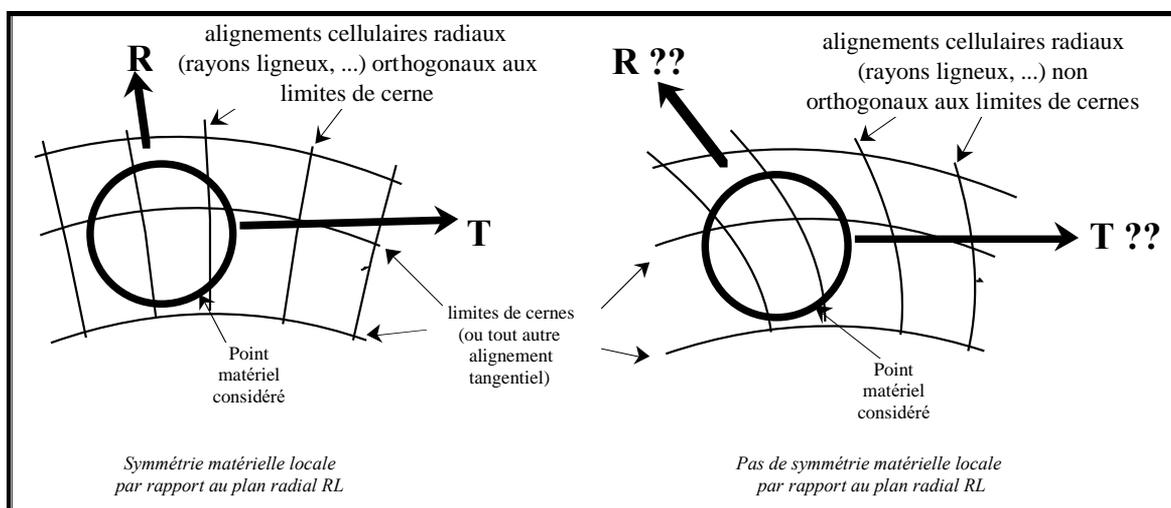


Fig. III-3 : Mise en défaut possible de l'hypothèse d'orthotropie locale

de bois, le repère local varie (figure III-3). Il est souvent justifié d'admettre que cette variation suit un repère cylindrique dont l'axe correspond à la moelle de la tige dont le bois fait ou faisait partie, on parle alors d'orthotropie cylindrique. Celle-ci peut être à nouveau être mise en défaut de multiples manières : conicité du tronc, angle de fil, flexuosité des cernes, nœuds, etc.

### Niveau de la pièce de bois

- Enfin si l'on se place à l'échelle de la structure tout entière, l'arbre comme assemblage de tiges ou l'ossature d'un pont ou d'un bâtiment, la tige ou la poutre sont vues comme des milieux curvilignes (1D) dont il faut connaître les rigidités en compression, flexion et torsion, obtenues par intégration à partir du comportement local. De même, des éléments plans (contreplaqués, LVL) sont décrits par des grandeurs globales 2D.

### III-1.2. ANISOTROPIE ET PASSAGES MICRO-MACRO

Le poids respectif de paramètres structuraux habituellement utilisés dans les passages micro-macro (densité, angle des microfibrilles, facteurs de formes) est fortement dépendant de la direction considérée. Les règles générales sont les suivantes :

- Dans la direction **longitudinale** l'angle moyen des microfibrilles (AMM) est le premier paramètre explicatif vis-à-vis de quantités spécifiques (rapportées à la densité) ; cependant, plus l'AMM est grand, plus les propriétés de la matrice sont susceptibles d'influencer aussi le comportement.
- dans les directions **transverses** c'est la structure cellulaire et la densité qui jouent les rôles prédominants.

Dans la direction L, du fait de la structure de type nid d'abeille du bois, l'influence de la densité peut être plus ou moins éliminée en considérant des quantités "spécifiques" telles que la contrainte divisée par la densité. C'est ainsi que le module d'Young peut être modélisé par le produit de la densité par une fonction décroissante de l'angle moyen des microfibrilles (AMM), correspondant au module spécifique de la paroi. Plus l'angle est élevé, plus d'autres facteurs caractérisant le comportement de la matrice sont impliqués [Salmen et de Ruvo (1985), Norimoto et al. (1986)]. Soulignons toutefois que ce type de modèle constitue une approximation du premier ordre, qui perd probablement beaucoup de sa validité dans le cas de feuillus à forte proportion de rayons ligneux.

Dans les directions transverses, le facteur AMM joue un rôle mineur comparé à d'autres. L'influence de la densité, quant à elle, est plus complexe que dans la direction L, et peut même dans certains cas être dominée par celle de facteurs de forme décrivant l'ensemble du plan ligneux ou, plus localement, les dispositions des parois cellulaires les unes par rapport aux autres. Excepté pour des bois très denses, la densité est approximativement proportionnelle à l'épaisseur des parois. Toutefois cela n'est pas d'une grande aide pour formuler des conclusions générales, du fait que la déformation d'un réseau cellulaire met en jeu une combinaison de flexion des parois et d'élongation dans leur plan (déformations de membrane) : or, la rigidité en flexion d'une paroi dépend du cube de son épaisseur, tandis que la rigidité de membrane est proportionnelle à cette épaisseur.

Les relations du type  $C=\rho^n$ , où C désigne une rigidité et  $\rho$  la densité, doivent donc être utilisées avec précaution. Dans certains cas elles ont une base physique, dans d'autres une base purement statistique. Par exemple, le résultat de Gibson et Ashby (1988) donnant  $n=3$  pour les modules d'Young  $E_R$  et  $E_T$ , est justifié physiquement dans le cas du Balsa mais ne peut se généraliser,

a priori, aux bois de plus grande densité. Inversement, les relations “standards” de Guitard et El Amri (1987) n'ont donc pas de base physique mais s'appliquent à des feuillus couvrant une large gamme de densités ; elles sont basées sur une compilation de données de la littérature, limitée aux cas où tous les termes de la matrice des complaisances élastiques étaient donnés. Elles reflètent une certaine corrélation des facteurs de forme associés aux plans ligneux des espèces considérées. De même, la quasi-proportionnalité à la densité observée par les mêmes auteurs pour  $E_L$  suggère que pour le jeu d'espèces pris en compte, il n'y avait pas de corrélation entre densité et angle moyen des microfibrilles.

### III-1.3. L'EAU DANS LE BOIS

On a coutume de distinguer dans le bois eau libre, liée et de constitution. L'eau *libre* se trouve à l'état liquide ou gazeux dans les lumens. L'eau *liée* est adsorbée dans la paroi cellulaire, c'est-à-dire insérée dans le réseau moléculaire de la matrice par des liaisons hydrogène ; son état chimique est ainsi proche de celui de la glace. L'eau *de constitution* est partie intégrante de la structure moléculaire et ne peut en être extraite sans destruction de la matière. Le bois vert est celui qui a toujours contenu de l'eau libre à l'état liquide, de sorte que les parois sont saturées. C'est le cas habituellement du bois dans l'arbre. Lors du séchage, cette eau libre liquide est d'abord extraite, puis une partie de l'eau liée quitte les parois jusqu'à équilibre de son potentiel chimique avec celui de l'eau libre encore contenue à l'état gazeux dans les lumens. On admet qu'après un séjour de 24 heures dans une étuve à 103°C, un échantillon de bois ne contient plus d'eau liée : cela définit l'état anhydre qui sert de référence pour le calcul du taux d'humidité :

$$h = \frac{M - M_0}{M_0} \quad ; \quad M = \text{masse de l'échantillon} \quad ; \quad M_0 = \text{masse anhydre}$$

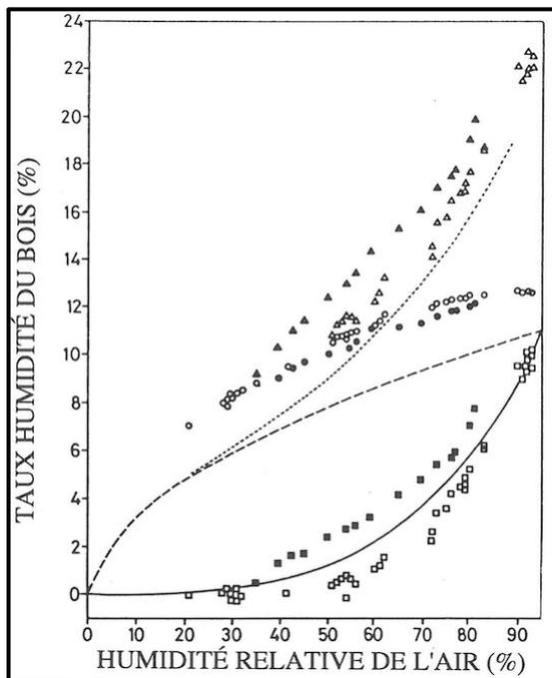
Lorsque l'on souhaite éviter de trop chauffer le bois, on peut atteindre un état hydrique très proche en plaçant l'échantillon sous vide en présence de  $P_2O_5$ .

L'idée que le bois perd d'abord son eau libre, puis son eau liée permet de définir la notion de *point de saturation des fibres* (p.s.f.) correspondant à l'état théorique dans lequel le bois contiendrait toute son eau liée mais plus d'eau libre à l'état liquide. En réalité la transition entre l'état liquide et celui de l'eau liée est progressive, et fonction de la taille décroissante des micropores, l'eau pouvant encore être considérée comme liquide dans les plus gros des micropores pariétaux. Le p.s.f. peut malgré tout être évalué à partir de la variation de propriétés physiques ou mécanique en fonction du taux d'humidité : il vaut typiquement 30% à 20°C, et diminue de 0,1% par °C d'élévation de température d'après Siau (1984). Les isothermes de sorption du bois font apparaître une hystérésis marquée entre désorptions et adsorptions successives. En outre, la première désorption se démarque nettement des suivantes, suggérant que le premier séchage induit des modifications structurelles irréversibles.

L'eau libre n'agit qu'occasionnellement sur le comportement macroscopique du bois : effet “lubrifiant” à l'usinage, surpression sous l'effet de variations de température, effondrement cellulaire dû, soit à la succion capillaire, soit aux contraintes de séchage), etc.. Ce sont les variations d'humidité dans le domaine *hygroscopique* ou en deçà du p.s.f., qui produisent les effets principaux, dimensionnels et comportementaux. Toutefois, même dans le domaine hygroscopique il importe de distinguer comme Bazant (1985) la macrodiffusion ou

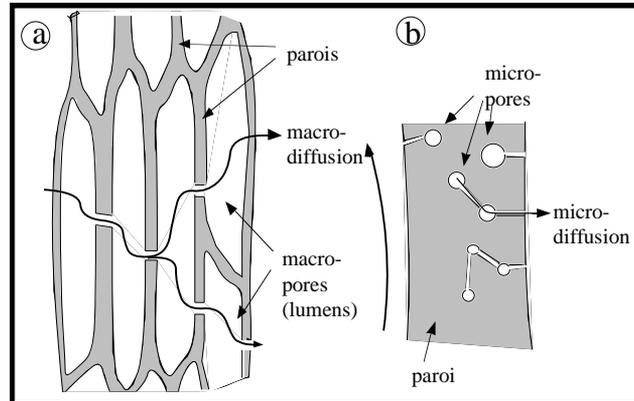
mouvement d'eau libre entre *macropores* (les lumens), de la microdiffusion qui concerne l'eau liée et s'opère entre les *micropores* ou sites de sorption diffus dans la paroi cellulaire (figure III-4). Un gradient constant entre deux faces d'une pièce de bois produit de la macrodiffusion mais pas de microdiffusion, tandis que sauf exception (collapse...) seule la microdiffusion induit des variations dimensionnelles et comportementales.

De même que le passage entre eau libre et liée est relativement progressif, il ne



**Fig. III- 5 : Décomposition de l'eau liée selon Hunt (1990)**

Le taux d'humidité total (triangles)  $h_I+h_{II}$  est séparée en  $h_I$  (ronds) correspondant à l'expansion L axiaux et  $h_{II}$  (carrés) indépendant de l'expansion L, pour des cyclages entre 30% et 93% d'humidité relative. Symboles blancs : humidification ; symboles noirs : déshumidification. Température : 23.5°C. Les lignes représentent les valeurs proposées par Kollmann (1963) à 25°C, tirets : eau d'adsorption ; continu : de condensation (submicroscopique + microscopique) ; pointillé : total adsorption + condensation.

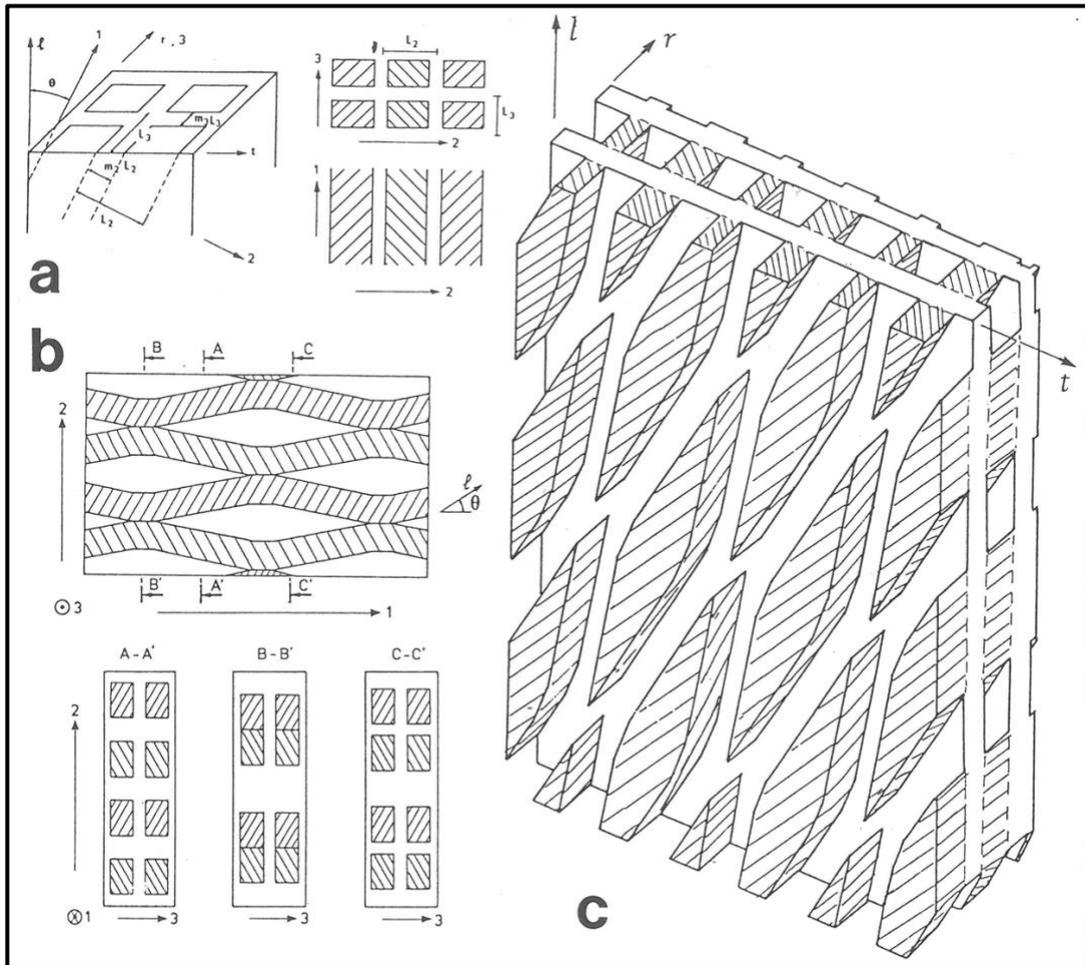


**Fig. III-4 : Macrodiffusion et microdiffusion**

(a) La macrodiffusion entre lumens court-circuite largement les parois cellulaires ; elle concerne les gradients d'humidité macroscopiques. (b) La microdiffusion relie les micropores de la paroi aux lumens les plus proches, elle tend à rétablir l'équilibre de potentiel chimique entre lumens et parois (la représentation n'a aucune prétention de réalisme).

faut pas considérer toute l'eau liée comme un constituant homogène. On distingue ainsi la première couche d'eau directement adsorbée sur les constituants moléculaires, des couches suivantes liées à d'autres molécules d'eau. Ainsi Kollmann (1963) distingue dans l'eau liée une part véritablement adsorbée, de condensation submicroscopique et de condensation microscopique, contribuant pour respectivement 11%, 12% et 7% aux 30% totaux du p.s.f.. Hunt (1990) retrouve une distinction similaire à partir de mesures précises de gonflement et retrait dans la direction L (figure III-5), l'eau adsorbée étant supposée être celle qui contribue aux mouvements longitudinaux. Il a d'autre part observé que l'hystérésis de l'expansion longitudinale vis-à-vis du taux d'humidité disparaît lorsqu'on l'exprime en fonction de l'humidité relative. Il en a conclu qu'une partie seulement de l'eau adsorbée est impliquée dans les mouvements longitudinaux. Cela pourrait être relié avec une distinction que nous avons faite dans [Gril (1988)] entre deux types de site de sorption : eau *lenticulaire* adsorbée dans les zones amorphes incrustée entre les microfibrilles et eau *lamellaire* dans des couches tangentielles de

matrice placées dans la paroi en alternance avec les couches de microfibrilles (voir la figure III-6). C'est principalement l'eau lamellaire qui produirait les variations dimensionnelles transverses et l'eau lenticulaire qui interagirait avec les sollicitations mécaniques.



**Figure III-6 : Modélisation périodique de la matière ligno-cellulosique d'après Gril (1988)**

(a) Modèle classique avec microfibrilles de section carrée, parallèles entre elles et inclinées d'un angle  $\theta$  par rapport à la direction axiale de la cellule. (b) Modèle modifié de manière à avoir des liaisons latérales périodiques entre microfibrilles. (c) Vue en perspective du volume occupé par la matrice sans les microfibrilles, faisant apparaître des lenticules (zones hachurées) en "série" avec les microfibrilles et des lamelles de matrice (zones non hachurées) en "parallèle" avec les lamelles contenant les microfibrilles.

Le phénomène de retrait observé au séchage trouve sa source dans le départ de l'eau liée au niveau des zones amorphes de la matière ligno-cellulosique. Le réseau microfibrillaire cristallin n'est pas concerné directement puisqu'il est hydrophobe mais il est sollicité par la pression négative exercée par la matrice hydrophile qui l'entoure. Ceci constitue un premier niveau de contraintes de séchage, dues aux différences de comportement hygroscopique des constituants. Un niveau supérieur de contraintes résiduelles intervient à l'échelle de la paroi cellulaire, constituée de sous-couches dont les retraits ne sont pas compatibles ; il en est ensuite de même pour tous les niveaux d'observation, en passant par les tissus de base et jusqu'aux alternances de bois léger et dense. Le résultat de tous ces processus microscopiques est un retrait macroscopique fortement anisotrope, associée à la genèse de contraintes résiduelles et parfois une détérioration considérable du matériau. Ajoutons qu'ils se superposent aux contraintes

résiduelles induites par la maturation cellulaire, évoquées dans la partie I, et cela aussi à tous les niveaux de la microstructure.

A côté de son action directe sur les dimensions, le taux d'eau liée influe indirectement sur le comportement par l'intermédiaire de la matrice dont la mobilité moléculaire est fortement sensible à l'eau comme à la température. Nous avons déjà évoqué, dans le chapitre II.1, l'influence de la température dans le cas d'un bois conservé à l'état vert. Nous allons dans la suite de cette partie aborder le cas général de variations d'humidité et de température y compris dans le domaine hygroscopique.

## III-2. LE COUPLAGE HYGROMECHANIQUE

La recherche sur la mécanosorption répond à trois principales demandes :

- (i) prédire la réponse mécanique à long terme d'une structure bois soumise à des charges et des sollicitations hygrothermiques données ;
- (ii) réduire les fentes, les distorsions et les contraintes résiduelles induites par le séchage ;
- (iii) optimiser les procédés de mise en forme.

Pour l'objectif (i) l'étude de la direction longitudinale, à des charges bien inférieures à la limite de linéarité, est prioritaire, même si la prise en compte de la direction transverse s'impose au niveau des connections. Pour (ii), c'est à l'inverse la direction transverse aux fibres, jusqu'à des niveaux de charges approchant la limite de rupture, qui présente de l'intérêt. Dans le formage du bois (iii), on trouve des deux puisque le cintrage agit dans le sens longitudinal et la densification par thermocompression dans le sens transverse.

On peut chercher à simplement quantifier et prédire la mécanosorption, mais aussi à agir sur elle par des traitements appropriés.

L'étude de l'effet mécanosorptif a constitué un thème prioritaire au sein du COST 508 "Wood mechanics" (1990-1996). De fait, la progression dans ce domaine, entre le premier séminaire du COST 508 à Lund en 1991 et la Conférence finale de Stuttgart en 1996, était flagrante. L'Action COST E8 "Performance of wood and wood made products" (1996-2000) qui fait suite au COST 508 a affiché dans son cahier des charges l'étude des relations eau/bois, des conditions non-standard et des couplages hygro-thermo-mécaniques. Le premier séminaire de cette Action programmé pour juin 1997 à Copenhague concernera les relations eau/bois.

### III-2.1. L'EFFET MECANOSORPTIF

Comme tout polymère hygroscopique, le bois réagit à l'humidité et à la température en se déformant. Cette expansion hygrothermique est essentiellement réversible, c'est-à-dire qu'à la suite d'un cycle hygrothermique ramenant le matériau à l'environnement de départ, il retrouve sa forme initiale. Or, si durant une partie de ce cycle il a été contraint mécaniquement, il conserve une déformation permanente d'autant plus grande que la contrainte et les variations d'humidité sous contrainte auront été fortes. Cette interaction entre sorption et action mécanique est le couplage mécanosorptif.

Une autre manière d'envisager la mécanosorption consiste à partir du comportement viscoélastique. Toujours en tant que polymère hygroscopique, le bois présente une viscoélasticité fortement influencée par l'humidité et la température qui toutes deux jouent le rôle de "plastifiant" dans le sens qu'elles agissent sur la mobilité moléculaire. Or, si une sollicitation quasistatique telle qu'un essai de fluage (mais aussi bien de relaxation ou de vibration par exemple) est appliquée en ambiance variable, la réponse mécanique peut être bien plus considérable que si l'ambiance avait été maintenue constante à l'humidité et la température la plus élevée de l'essai. Après décharge et retour à l'ambiance de départ il demeure une déformation permanente correspondant au supplément de viscosité produit par le couplage mécanosorptif.

L'équivalence entre ces deux formulations avait été notée par Schniewind (1968). Dans les deux cas, c'est l'apparition d'un blocage, sous la forme d'une déformation permanente, qui caractérise de la manière la plus évidente l'action du couplage. Mais du fait de la nature de polymère semi cristallin du bois, son blocage est un état métastable qui tend à disparaître lentement. Cette recouvrance est fortement accélérée par des cycles d'humidité et l'action éventuelle de la température : le même couplage assure blocage et déblocage.

Le problème du couplage mécanosorptif est résumé sur la figure III-7 dans laquelle l'axe des abscisses représente les variations de paramètres liée à l'ambiance (température  $\theta$ , humidité relative HR, humidité du bois  $h$ ) et l'axe des ordonnées celles des grandeurs mécaniques (déformation  $\varepsilon$ , contrainte  $\sigma$ ). La donnée de l'expansion hygrothermique (pointillés) d'une part, d'essais de fluage ou relaxation en ambiance constante (flèches verticales) d'autre part ne suffisent pas à prévoir la réponse mécanique du matériau dans un cas quelconque (ligne courbe).

Il faut ajouter que cette partie ne concerne que la loi de comportement du matériau. La diffusion est considérée comme étudiée indépendamment et fournir en "entrée" le taux d'humidité du matériau situé à la position considérée dans la structure. L'influence possible (quoique faible a priori) de l'action mécanique sur la sorption et la diffusion n'est pas étudiée.

### III-2.2. LA DECOMPOSITION DE LA DEFORMATION

On est, en résumé, en présence de trois phénomènes :

- l'expansion hygrothermique ;
- le comportement viscoélastique ;
- le couplage mécanosorptif.

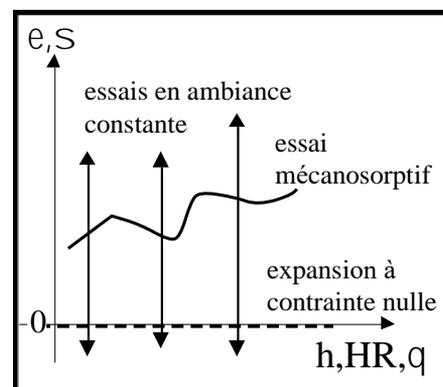


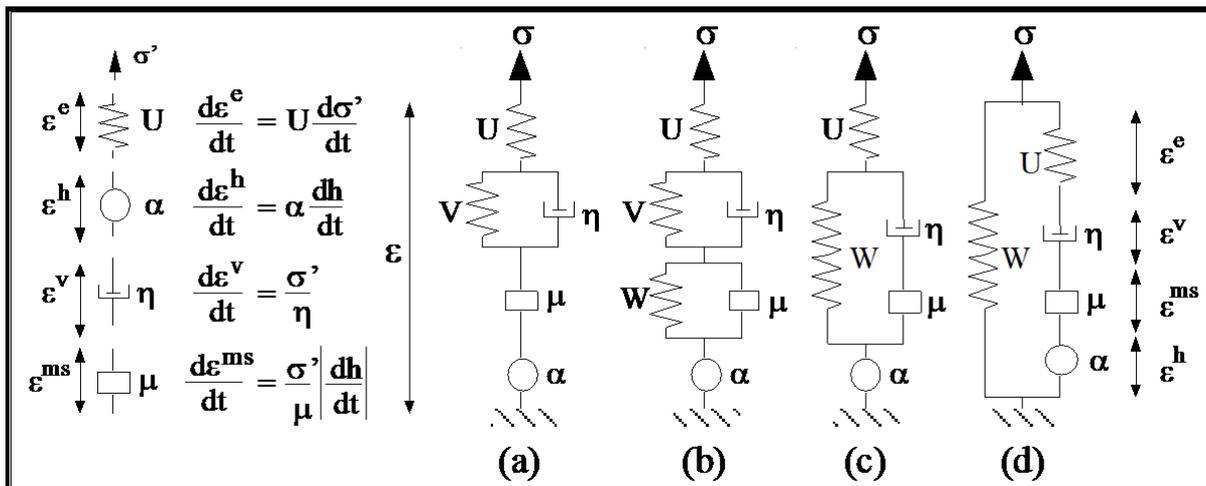
Fig. III-7 : Le couplage mécanosorptif

On ne peut prévoir la réponse mécanique du matériau dans un cas quelconque (ligne courbe) à partir de la seule connaissance de l'expansion hygrothermique (pointillés sur l'axe des abscisses) d'une part et du comportement viscoélastique en ambiances hygrothermiques constantes (flèches verticales) d'autre part.

La caractéristique de l'expansion hygrothermique est de dépendre réversiblement de l'humidité et de la température. La viscoélasticité fait intervenir toute l'histoire antérieure des sollicitations mécaniques, mais aussi des conditions hygrothermiques puisque les paramètres de viscosité dépendent de l'humidité et de la température. Quant au couplage mécanosorptif, il est mis en jeu sous l'action d'une sollicitation mécanique associée à une variation du taux d'humidité du bois, qu'il s'agisse d'adsorption ou de désorption ; les travaux de plusieurs auteurs semblent montrer qu'il peut être correctement décrit sans faire intervenir explicitement le temps : il suffirait de connaître les variations successives de sollicitations mécaniques et de l'ambiance hygrothermique, indépendamment des vitesses de ces variations, pour prédire les incréments de la réponse mécanosorptive. Ce point que nous discutons en détail dans Gril (1988), a fait récemment l'objet d'une vérification expérimentale particulièrement soignée à l'occasion du stage d'E. BALSAN en Grande-Bretagne [Hunt (1996)].

La modélisation la plus simple de ces effets peut être réalisée au moyen de la combinaison des quatre types d'éléments rhéologiques représentés sur la figure III-8 : ressort élastique de complaisance  $U$ ,  $V$  ou  $W$  ; expansion hygrométrique de coefficient  $\alpha$  ; amortisseur visqueux linéaire de coefficient de viscosité  $\eta$  ; élément mécanosorptif caractérisé par un coefficient mécanosorptif  $\mu$  homogène au produit d'une viscosité par l'humidité. Précisons que le paramètre humidité  $h$  est ici le taux d'humidité du bois (masse d'eau divisé par la masse anhydre), fonction de l'humidité relative et de la température. Dans tous les cas proposés sur la figure, nous nous plaçons dans le cadre de l'hypothèse des petites perturbations et supposons que la déformation totale  $\varepsilon$  s'écrit comme la somme de quatre termes, élastique  $\varepsilon^e$ , hygrométrique  $\varepsilon^h$ , visqueux  $\varepsilon^v$  et mécanosorptif  $\varepsilon^{ms}$  :

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^h + \varepsilon^v + \varepsilon^{ms}$$



**Fig. III-8 : Modèles rhéologiques mécanosorptifs.**

A partir des éléments de base (ressort de complaisance  $U$ ,  $V$  ou  $W$ , expansion hygrométrique de coefficient  $\alpha$ , amortisseur de viscosité  $\eta$ , élément mécanosorptif de coefficient  $\mu$ ), on peut construire toutes sortes de modèles : (a) indépendance des quatre modes de déformation avec fluage mécanosorptif illimité ; (b) idem avec déformation limitée ; (c) interaction entre fluage pur et mécanosorptif ; (d) intégration de l'expansion dans les mécanismes différés.

Les combinaisons (a) et (b) offrent la particularité de produire une dissociation complète des quatre phénomènes, autrement dit l'évolution de l'un n'influence pas celle des autres. Ces

approches sont les plus populaires car elles sont celles qui se prêtent le mieux à de la modélisation numérique. Dans le cas (a) la déformation mécanosorptive est susceptible d'augmenter indéfiniment. Malgré cette caractéristique peu réaliste, elle est suffisante si l'on reste loin de l'équilibre. C'est le cas du modèle de Toratti (1992) ou plus récemment du code développé par Mauget (1996) par exemple. Avec l'introduction d'un paramètre de complaisance mécanosorptive  $W$  on obtient le modèle (b) plus satisfaisant, qui d'ailleurs se ramène à (a) pour des valeurs suffisamment fortes du produit  $\mu W$ . Les modèles de Mårtensson (1992) ou de Salin (1992) se rattachent à ce type.

Dans les combinaisons (c) et (d) en revanche, les mécanismes interagissent entre eux. En (c) les déformations visqueuse et mécanosorptive agissent sur la même complaisance différée  $W$ . Ce modèle est une manière simple de représenter l'hypothèse selon laquelle viscosité et mécanosorption mettent en jeu les mêmes processus de déformation, la sorption permettant d'atteindre plus rapidement ce qu'il l'aurait de toute manière été au bout d'un temps suffisamment long à humidité constante, par le simple effet de la viscosité. Enfin en (d) le couplage est complet entre tous les processus de déformation, en particulier on prédit dans ce modèle que l'expansion hygrométrique, même en l'absence de contrainte extérieure, induit une part de viscosité et donc n'est pas entièrement synchronisée avec la variation d'humidité.

Les complaisances peuvent dépendre de l'humidité à cause des changements de structure induits, mais surtout les viscosités dépendent de la température et de l'humidité du fait de leur influence sur les temps caractéristiques des processus visqueux. D'autres mécanismes de déformation peuvent être ajoutés, associés à d'autres dispositions des éléments. Ainsi Toratti (1992) ajoute-t-il un paramètre d'endommagement pour pouvoir décrire le cas des efforts importants, alors que Hanhijärvi (1995) propose un modèle sophistiqué que l'on peut considérer comme de type (d) à la base mais qui contient des combinaisons de type parallèle avec des amortisseurs non linéaires et des éléments d'expansion à plusieurs niveaux.

Enfin, une généralisation tensorielle des paramètres scalaires de ces modèles est souvent proposée par les auteurs de manière à permettre l'intégration dans un code de calcul. Cela ne pose pas de problème de principe mais suppose tout de même d'avoir correctement identifié les mécanismes de déformation.

### III-2.3. L'APPROCHE DES HYGRO-VERROUS

On attribue parfois au paramètre mécanosorptif  $\mu$ , notamment dans les approches numériques de type (a), des valeurs différentes selon que l'humidité augmente ou diminue, et selon qu'elle dépasse ou non le seuil de l'humidité maximale depuis le début de l'essai. Cette approche qui s'inspire du modèle de Ranta-Maunus (1975) sur le contreplaqué, présente quelques inconvénients théoriques et pratiques. Nous en discutons dans Gril (1988) en proposant la méthode des "hygro-verrous", reprise récemment à l'occasion du stage de DEA de A. LAGHDIR.

La caractéristique d'un modèle à hygro-verrous est d'être constitué d'éléments viscoélastiques dont la viscosité ne dépend que de la valeur actuelle de l'humidité, et non de sa cinétique (terme  $dh/dt$ ) comme dans le cas des éléments mécanosorptifs de la figure III-8. La simulation de la réponse mécanique est de ce fait entièrement basée sur l'évolution de variables cachées, rendue par l'image d'ouverture et fermeture de "boîtes". Des effets particuliers comme la dissymétrie

adsorption/désorption ou le seuil d'humidité maximale sont obtenus par la disposition des éléments les uns par rapport aux autres et par rapport au "front d'humidité" qui décrit l'action de l'eau. On en voit un exemple sur la figure III-9.

Cette approche n'a pas pour le moment de portée pratique vu le grand nombre de paramètres qu'elle nécessite de manipuler. En outre on sait maintenant expliquer d'une autre manière la dissymétrie apparente, dans le fluage en flexion, entre adsorption et désorption, depuis que Hunt et Shelton (1988) ont clairement démontré qu'elle résulte de l'augmentation du coefficient de retrait avec la compression du bois. Elle présente toutefois l'intérêt de proposer une interprétation originale de la mécanosorption comme étant liée à des reports de contraintes entre constituants du bois, ce qui n'est pas totalement irréaliste si l'on pense à la forte hétérogénéité de la réaction à l'humidité des composants microstructuraux [Hunt (1996)].

L'idée d'hygro-verrous amène aussi à s'interroger sur la signification du paramètre d'humidité  $h$ . Il n'est pas certain que le taux d'humidité total du bois soit le mieux adapté pour représenter tous les effets, car dans certains cas une partie seulement de l'eau adsorbée participe activement à la déformation [Hunt (1990)].

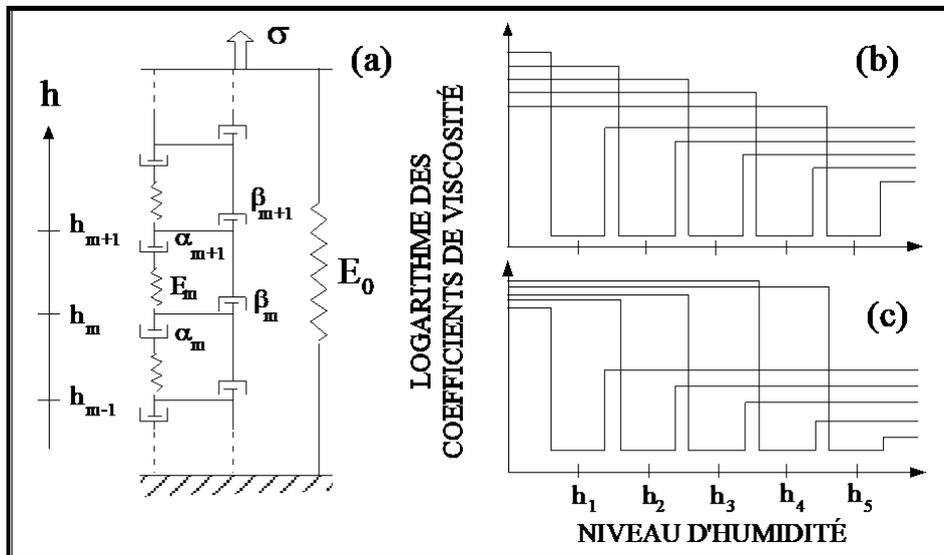


Fig. III-9 : Un exemple de modèle à hygro-verrous

Chaque "boîte" constituée d'un ressort et deux amortisseurs correspond à une plage d'humidité paramétrée par des valeurs discrètes  $h_m$  de l'humidité  $h$ . (a) : modèle rhéologique avec un ressort P en parallèle assurant une déformation limite ; (b) dépendance des viscosités ( $\alpha_m$  ou  $\beta_m$ ) en fonction de  $h$  avec pour chaque boîte  $m$  des valeurs fortes à l'état sec, plus faible à l'état humide et très faible au passage au voisinage de  $h_m$ . Dans ce cas une égale dispersion des temps caractéristiques à l'état humide et sec est supposée, alors qu'en (c) l'étalement du spectre des temps caractéristiques tend à augmenter avec le niveau d'humidité.

#### III-2.4. CARACTERISATIONS EXPERIMENTALES

On a l'habitude dans l'étude du comportement viscoélastique linéaire, de considérer qu'un nombre limité de tests simples, tels que du fluage ou de la relaxation, pourront suffire à caractériser le matériau. Or le couplage mécanosorptif est un phénomène essentiellement non linéaire. Cela est illustré par le fait que dans la loi de variation de l'élément mécanosorptif ( $\epsilon^{ms}$ ) de la figure III-2, intervient le produit de la contrainte ( $\sigma'$ ) par la variation d'humidité ( $dh/dt$ ).

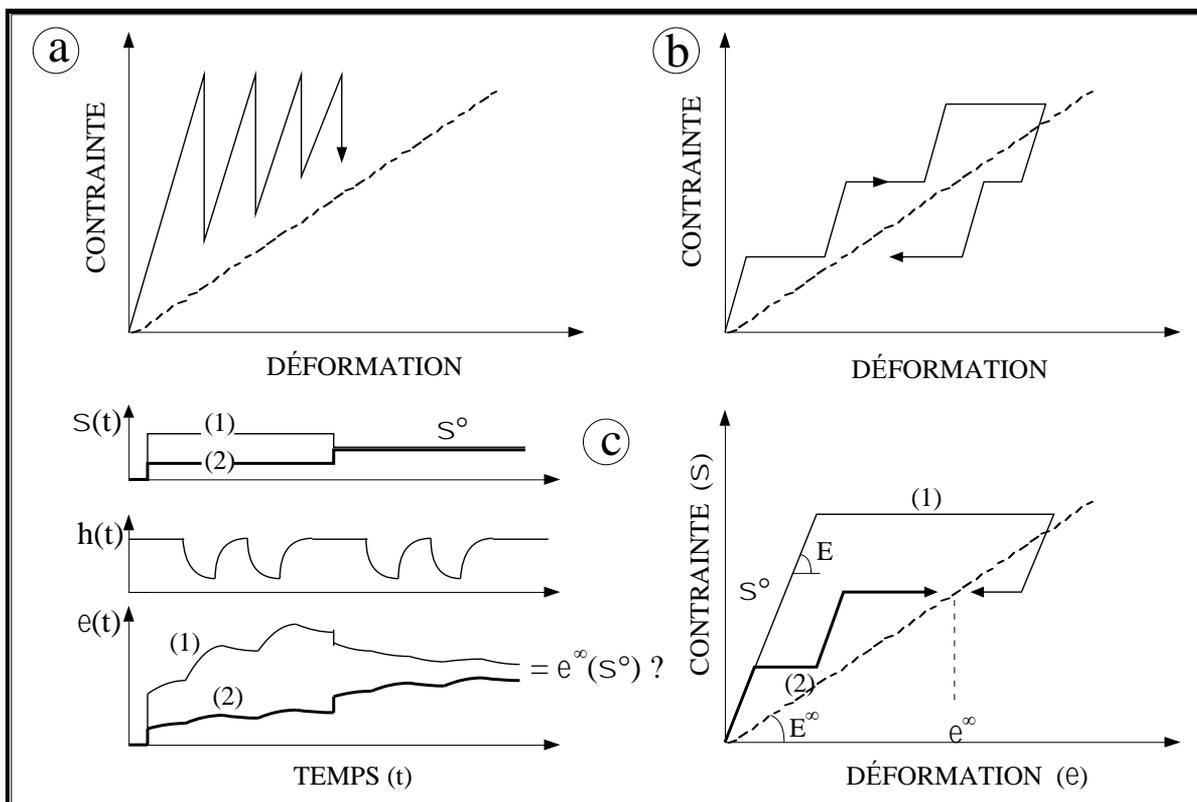
A cela s'ajoute une apparition précoce de non-linéarité par rapport à la contrainte, surtout aux fortes humidités. Il est donc hors de question de se suffire d'essais trop simples pour caractériser le comportement hygro-thermo-mécanique.

L'étude expérimentale du comportement différé du bois doit répondre à deux questions :

- l'état limite : la réponse du matériau soumis à une sollicitation mécanique constante tend-elle vers une limite sous l'effet d'un grand nombre de cycles de sorption ?
- l'état transitoire : peut-on constituer un modèle capable de prédire, pour une histoire donnée de chargement mécanique et sollicitation hygrothermique, la réponse mécanique à tout instant ?

Vis-à-vis du comportement à long terme de structures, l'état limite est la préoccupation principale. A l'inverse, le séchage ou la mise en forme sont typiquement des actions transitoires. Si l'on se réfère aux modèles rhéologiques de la figure 2, pour l'état limite il suffit de connaître les complaisances différées  $V$  ou  $W$  ; pour l'état transitoire il faut tous les paramètres, et tout au moins les valeurs de  $\mu$  et  $\eta$  pour le début des processus.

Les essais multi-paliers constituent l'une des réponses possibles à la question de l'état limite. Leur principe est rappelé sur la figure III-10. Ils consistent à tenter d'approcher, par des paliers de charge ou de déformation durant lesquels sont imposés des cycles hygrothermiques, une hypothétique loi de comportement limite.



**Fig. III-10 : Principe d'une procédure multi-paliers**

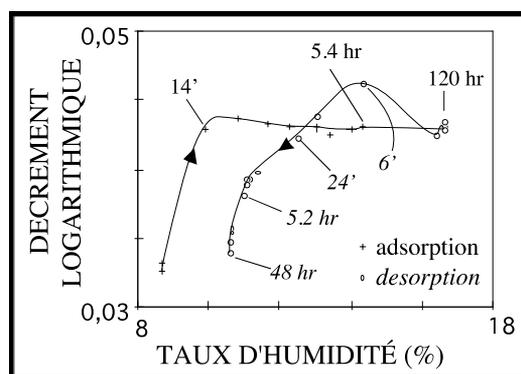
A chaque palier de déformation (a: relaxation multi-paliers) ou de contrainte (b: fluage multi-paliers) est appliqué un ou plusieurs cycles d'humidité destiné à accélérer l'approche vers l'état d'équilibre. La mise en place de telles procédures est fortement liée à l'hypothèse de l'état limite (c), soit que l'on y croit et cherche à l'identifier, soit que l'on s'efforce de la mettre en défaut.

Pour la détermination des paramètres de l'état transitoire, signalons par exemple le test "flying wood" développé par l'équipe de P. PERRE à l'ENGREF Nancy [Brandão (1996)]. Elle consiste à observer la courbure prise par une planchette ne séchant que sur une face. Cette méthode est complémentaire de celle de Vanek (1986) qui empêche la flexion et mesure le moment induit au cours du temps.

### III-2.5. INTERPRETATION MICROSTRUCTURELLE DE L'EFFET MECANOSORPTIF

Une première interprétation possible de la mécanosorption se situe à l'échelle moléculaire. Elle est basée sur l'hypothèse selon laquelle une partie des liaisons hydrogènes impliquées dans le processus de sorption sont aussi actives vis-à-vis des mécanismes de déformation du bois [Kauman (1966)]. Grossman (1978) a proposé un modèle qualitatif utilisant la notion d'élasticité "entropique" pour les composants moléculaires amorphes. Les modèles basés sur la cinétique moléculaire [Takemura (1966), Bazant (1985), Gril (1986), van Der Put (1994), Hanhijärvi (1995)] peuvent être considérés comme inspirés de ce concept.

Avec Back et al. (1983) l'idée d'une mobilité moléculaire accrue a remplacé l'image simpliste de "rupture et reformation de liaisons" pour décrire l'effet transitoire de la sorption. Plus récemment, nous avons proposé d'utiliser le concept de *vieillesse physique* (réversible) pour expliquer des effets transitoires tels que ceux montrés sur la figure III-11. Lorsqu'une brutale variation d'humidité relative est imposée à un échantillon de bois suffisamment petit pour ne pas entraîner d'effet de diffusion macroscopique, l'équilibre hygroscopique n'est malgré tout pas instantané du fait du temps nécessaire à la "microdiffusion" au niveau de la paroi cellulaire. La mesure simultanée des variations de masse et de propriétés mécaniques, notamment le décrement logarithmique longitudinal, met en évidence la complexité de cette microdiffusion. Celle-ci peut sembler être achevée si l'on ne considère que les cinétiques de variation de masse, alors que la grandeur mécanique met beaucoup plus de temps à atteindre l'équilibre. Ces observations confortent l'hypothèse d'un phénomène de vieillissement physique dans le bois, lié au temps nécessaire à la structure moléculaire pour se "compacter" à



**Fig. III-11 : Variations transitoires du décrement logarithmique durant la sorption**

Un échantillon d'épicéa de dimension  $L=85\text{mm}$  x  $R=3.2\text{mm}$  x  $T=0.5\text{mm}$ , initialement stabilisé à  $20^\circ\text{C}$  et 35% HR est placé à 81% HR pendant 120h, puis de nouveau à 35% HR pendant 48h. L'observation de pics du décrement logarithmique à la suite de chaque variation brutale d'ambiance, suivi d'une lente atteinte de la valeur d'équilibre, met en évidence une période transitoire bien plus longue que ce que laisserait présager la simple mesure du taux d'humidité. Cela est montré ici par des courbes du décrement (mesuré en vibration de flexion libre) en fonction du taux d'humidité. Les temps indiqués sont comptés à chaque fois à partir du début de la sorption.

la suite de variations dimensionnelles d'origine hygrothermiques [Hunt et Gril (1996), Hunt et Balsan (1996)].

L'absence d'effet en cas de gradient d'humidité constant Armstrong (1972) met en évidence le rôle joué par les changements dimensionnels et à première vue contredit l'hypothèse des ruptures de liaisons hydrogènes. Pour concilier ces deux visions, il suffit, comme Bazant (1985), de considérer que seule la microdiffusion agit sur l'effet mécanosorptif, tandis que la macrodiffusion ne produit ni variation dimensionnelle ni interaction avec la sollicitation mécanique (voir la figure III.4). Toutefois l'existence d'un effet mécanosorptif au dessus de la saturation des fibres en cas de collapse, mis en évidence par Armstrong (1983), montre que d'autres sources de changement dimensionnel que la sorption peuvent intervenir.

Un autre point faible des théories moléculaires réside dans l'absence de mécanosorption observée chez d'autres polymères possédant une structure polymérique semi cristalline, le nylon par exemple [Hunt et Darlington (1980)]. Cela suggère une contribution essentielle des particularités anatomiques du bois. Un effort dans ce sens est fait par Boyd (1982) qui remonte d'un cran le niveau de représentation en décrivant la structure de la matière ligno-cellulosique comme faite de la répétition périodique d'une enveloppe élastique de forme lenticulaire (le réseau microfibrillaire) enveloppant un gel hydrophile.

Le rôle des contraintes de séchage macroscopiques a été rapidement éliminé par les premiers auteurs du fait que l'effet semblait indépendant de la vitesse de sorption, de la taille de l'échantillon, etc. Mais dans un sens plus général, les contraintes de séchage sont produites par toute forme de retrait différentiel entre plusieurs parties du matériau. Du fait de la complexité et de l'hétérogénéité de la structure du bois, cela est susceptible d'être le cas à tous les niveaux.

La non-linéarité marquée de la mécanosorption vis-à-vis de la contrainte appliquée suggère une forte influence des contraintes internes. Celles-ci sont produites en premier lieu au niveau de l'interface matrice/microfibrille ; mais en même temps des niveaux supérieurs de l'organisation dans la paroi ou le cerne sont susceptibles de jouer un rôle. Même si les phénomènes de base sont associés aux liaisons hydrogènes, il nous faut savoir si l'action sur les liaisons est répartie dans toute la matière lignocellulosique, ou au contraire concentrée sur certaines lignes ou surfaces de la paroi. Si l'organisation pariétale fait que cette contrainte locale totale est très forte au voisinage de surfaces de la paroi ou du cerne, celles-ci deviennent des zones de faiblesse et constituent le niveau de représentation pertinent pour l'interprétation de la mécanosorption.

Le modèle de Mukudai et Yata (1986), basé sur l'observation d'une faiblesse à l'interface S1/S2, représente ainsi une piste originale qui présente l'intérêt de ne plus se limiter à l'échelle macro moléculaire. On y retrouve le concept d'affaiblissement causé par le déplacement d'un front d'eau dans la paroi, proposé par Yamada (1963). On pourrait classer aussi dans la catégorie des modèles pariétaux une approche que nous avons développée pour tenir compte de glissements possibles entre fibres, ce qui fait intervenir le comportement viscoélastique de la lamelle mitoyenne [[Hunt, 1994 #102]].

Nous avons vu que même dans l'état vert, les contraintes résiduelles et les déformations bloquées ne sont pas complètement éliminées par les découpes successives, du fait du mode

d'élaboration et de la nature viscoélastique du matériau. Si l'on prend en compte à la fois la recouvrance hygrothermique du bois vert et l'effet mécanosorptif, il est clair que le trajet hygrothermique suivi par le procédé de séchage choisi est susceptible d'avoir une influence non négligeable sur le comportement ultérieur d'un échantillon ou d'une pièce en dimension d'emploi.

### III-3. LE COMPORTEMENT EN CONDITIONS EXTREMES

Nous avons jusqu'à présent envisagé des sollicitations hygro-thermo-mécaniques variables, mais restant dans des conditions normales d'utilisation du matériau. Nous allons maintenant considérer le cas de sollicitations "extrêmes". Dans le bois elles peuvent l'être de deux manières (figure III-12) :

- soit par le fort niveau de sollicitation mécanique, bien au delà de la limite de linéarité : cela s'observe surtout en compression, dans une moindre mesure en cisaillement transverse, peu en traction ;
- soit par l'humidité et la température, dont les niveaux élevés peuvent susciter des mécanismes de déformation inconnus en condition normale.

Les transitions vitreuses des lignines, en grande partie dépassées vers 100°C dans le bois vert, ont été déjà mentionnées au § II-1.1. Cela ne vaut que pour le bois dont le taux d'humidité dépasse le p.s.f., en deçà des températures plus élevées sont nécessaires pour obtenir cet effet. Nous avons aussi évoqué au § II-1.2 les mécanismes de dégradation irréversible pouvant apparaître pour des niveaux ou des durées de sollicitation hygrothermique élevés. Nous allons maintenant aborder plus en détail ces aspects de grande importance pour certaines valorisations du matériau.

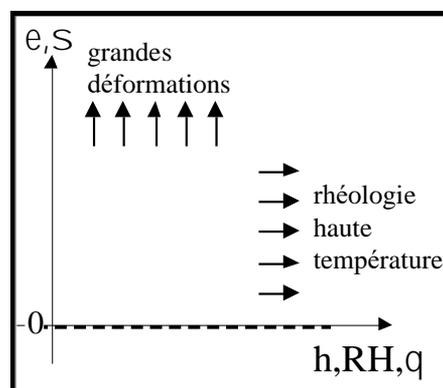
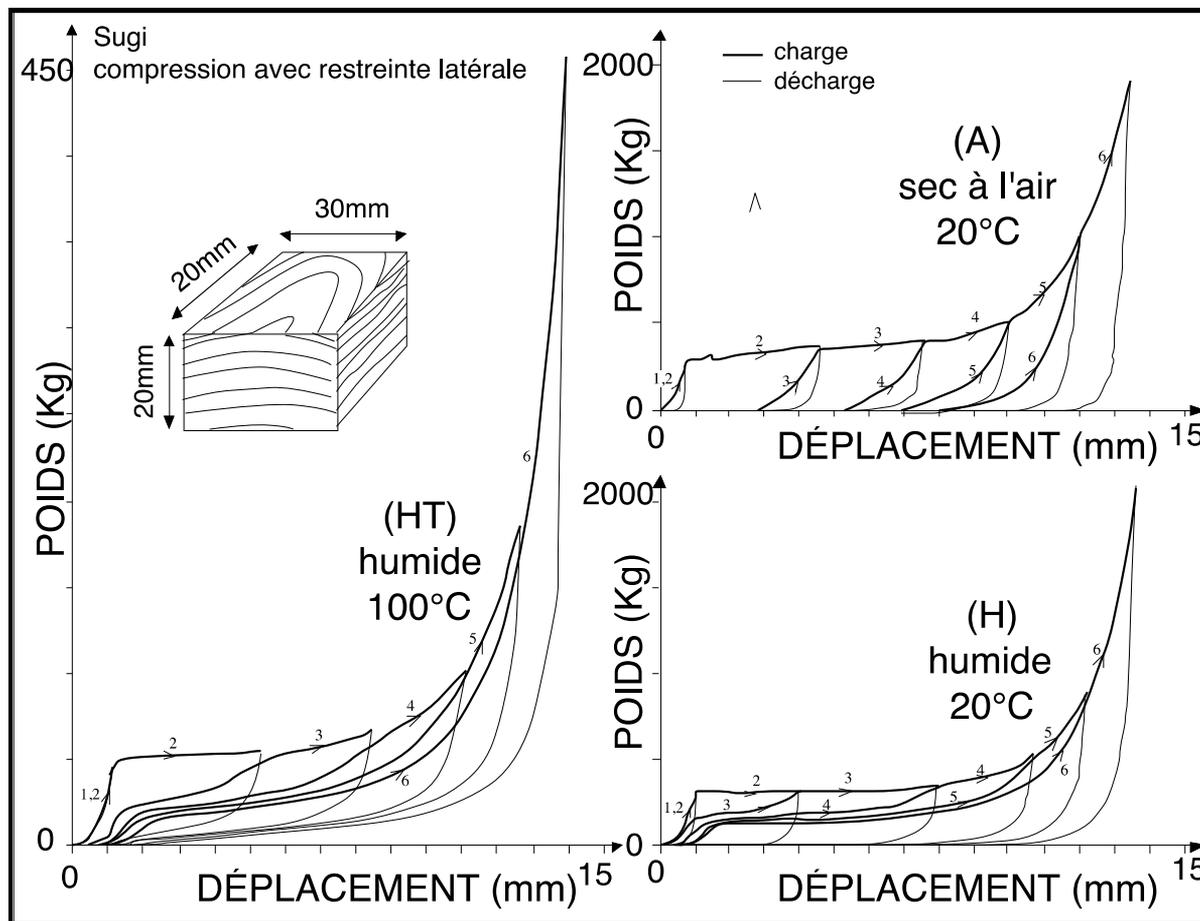


Fig. III-12 : Le domaine hygro-thermo-mécanique "non standard" pour le bois

#### III-3.1. GRANDES DEFORMATIONS EN COMPRESSION ET FORMAGE DU BOIS

L'exemple de la flèche cité en Introduction nous a familiarisé avec la forte compressibilité du bois dans la direction **transverse** aux fibres. Elle provient de sa structure cellulaire et est d'autant plus considérable que sa densité est plus faible. Comme le montre la figure III-13, les choses sont bien différentes selon que l'on a affaire à du bois sec, humide, ou chaud et humide. Le dépassement de la transition vitreuse de la lignine autorise des modes de déformations bien moins dommageables pour le matériau.

L'étude des grandes déformations transverses pose des problèmes de nature théorique et numérique. Des localisations de la déformation sont susceptibles d'apparaître, rendant délicate l'homogénéisation à partir d'une structure cellulaire élémentaire. Il serait utile de disposer d'une loi de comportement locale bidimensionnelle anisotrope, par exemple pour simuler par éléments finis l'effet des alternances entre bois initial et final sur le processus de coupe par tranchage ou déroulage.



**Fig. III-13 : Compression transverse d'un résineux**

Des cycles de compression à niveau de charge croissant mettent en évidence l'évolution des modes d'endommagement en compression radiale lorsque le bois passe de l'état sec à chaud et humide. En (A) les parois sèches subissent des ruptures fragiles, marquées par l'irrégularité des courbes ; en (B) et (C) le passage de la matière ligneuse à un état semi caoutchoutique permet des recouvrances presque totales, sans toutefois que l'endommagement soit absent, comme le montre la chute de limite de linéarité et de modules à la suite de chaque montée en charge.

Un développement intéressant de cette recherche a été obtenu dans le travail de DEA de E. BADEL sur la thermocompression radiale du bois, avec une application au pliage de placages de Peuplier destinés à l'industrie de l'emballage (figure III-14).

Enfin, ce thème a été l'occasion d'une collaboration originale avec des archéologues, confrontés à la présence de bois comprimé parmi des vestiges de charbons vieux de 10 millénaires. La reconstitution en laboratoire de faciès similaires sur des bois contemporains a permis d'appuyer l'hypothèse d'utilisation précoce par nos ancêtres de lignite comme combustible - haute température et haute humidité se substituant à la lente action des temps géologiques [Théry et al. (1995)].

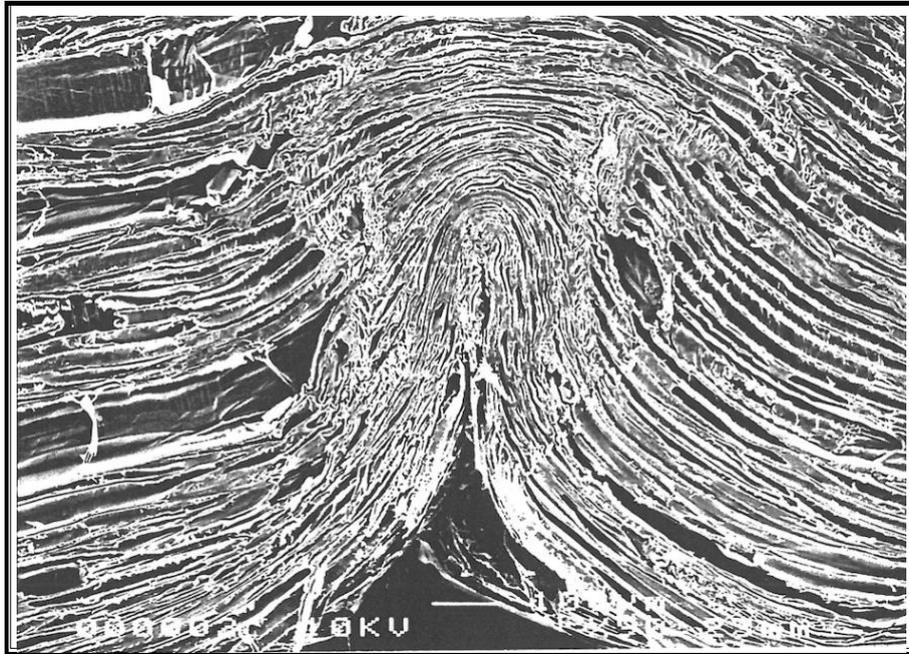


Fig. III-14 : Observation au microscope électronique à balayage du fond de pli réalisé sur placage de peuplier (Photo E. Badel)

Dans la direction **longitudinale** les grandes déformations du bois suffisamment chaud et humide peuvent atteindre jusqu'à 20%, par pliage en accordéon des parois des fibres. Cela permet le cintrage de barreaux de bois, d'application courante en ameublement. Des niveaux élevés de flexion sont obtenus en limitant la traction des faces concaves au moyen de guidages appropriés. L'échec du cintrage peut alors provenir d'une localisation de la compression sur la face convexe, sous forme de plis (figure III-15). On l'attribue habituellement, soit au non-dépassement de la transition vitreuse de la lignine, soit à un faible angle moyen des microfibrilles, l'un ou l'autre de ces facteurs aboutissant à une rigidité axiale de la paroi trop importante [Norimoto et Gril (1989)]. Le rôle d'échelles supérieures du plan ligneux (disposition des vaisseaux, alternances bois initial/final, etc.) demeure mal connu.

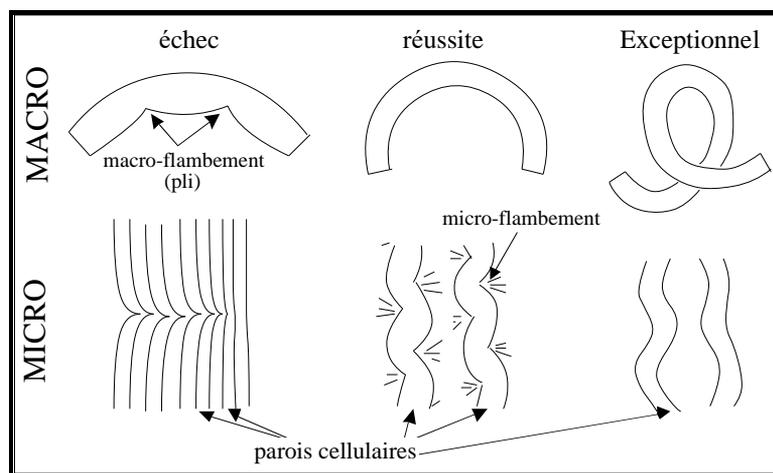


Fig. III-15 : Les classes d'aptitude au cintrage

(haut) : le cintrage d'un barreau ; (bas) : ce que l'on voit à l'échelle cellulaire. On classe les bois en trois groupes selon leur aptitude au cintrage. Celle-ci s'explique par la plus ou moins grande souplesse de la paroi parallèlement à la fibre, selon l'essence, la nature du bois, et le traitement hygrothermique.

Cette forte compressibilité du bois est la base des divers procédés de formage utilisés dans le bois tels que le cintrage de barreaux qui vient d'être mentionné ou la densification par thermoformage. Comme cela a été évoqué dans l'introduction à propos de la flèche de Cupidon, une opération de formage du bois peut être décomposée en quatre étapes [Gril (1989)] :

- (1) Le *ramollissement* obtenu en chauffant le bois préalablement humidifié. Ce traitement hygrothermique permet de dépasser la transition vitreuse de la lignine et confère au bois un comportement "caoutchoutique".
- (2) La *mise en forme*, dans le cas de la flèche une compression transversalement aux fibres pouvant atteindre des niveaux considérables du fait de la nature cellulaire du bois, assimilable en première approximation à un matériau de type nid d'abeilles. Dans le cas du cintrage les déformations sont moins importantes mais l'effet est tout aussi spectaculaire [(Norimoto et Gril 1989).
- (3) Le *blocage* réalisé en laissant refroidir puis sécher le bois à déformation imposée, de manière à provoquer, par couplage mécanosorptif, une mobilité moléculaire accrue et donc une très forte relaxation de la contrainte.
- (4) Le *fixation du blocage*, soit par une action mécanique externe, soit par un traitement chimique ou thermique tels que ceux utilisés pour la stabilisation dimensionnelle. Cela n'est nécessaire que si le produit formé est susceptible de se trouver dans des conditions risquant de provoquer le *déblocage*, comme un nouveau chauffage à l'état humide.

la figure III-16 propose une interprétation de ces différentes étapes à l'échelle macro-moléculaire, inspirée du mécanisme proposé par Boyd (1982) pour expliquer l'effet mécanosorptif. Le thème de la fixation du blocage est important car il conditionne l'intérêt pratique d'une mise en forme du bois. Il est en plein essor avec le développement de la chimie et des procédés technologiques applicables au bois.

Enfin, il est important de noter que pour expliquer le formage, il faut pouvoir se référer à des échelles d'espaces et des approches mécaniciennes variées. C'est ainsi que le ramollissement de l'étape (1) est décrit à l'échelle des macromolécules constitutives de la matière ligno-cellulosique et en employant le langage de la rhéologie des polymères semi cristallins, les grandes déformations de (2) s'expliquent par la structure cellulaire et font appel à la théorie des mousses et nids d'abeilles, le blocage-déblocage de (3) et (4) fait intervenir les interactions entre phases cristalline et amorphe avec cette fois la référence possible à une approche de milieu composite.

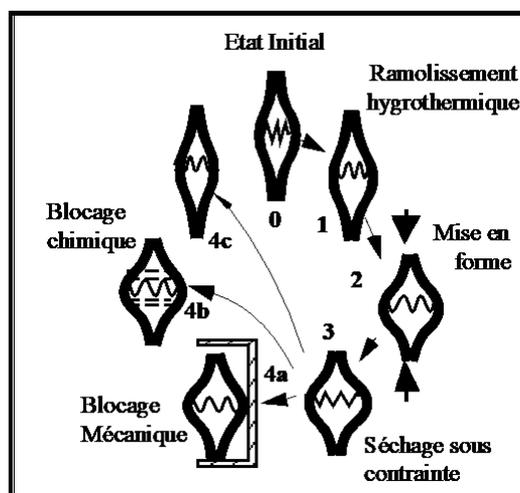
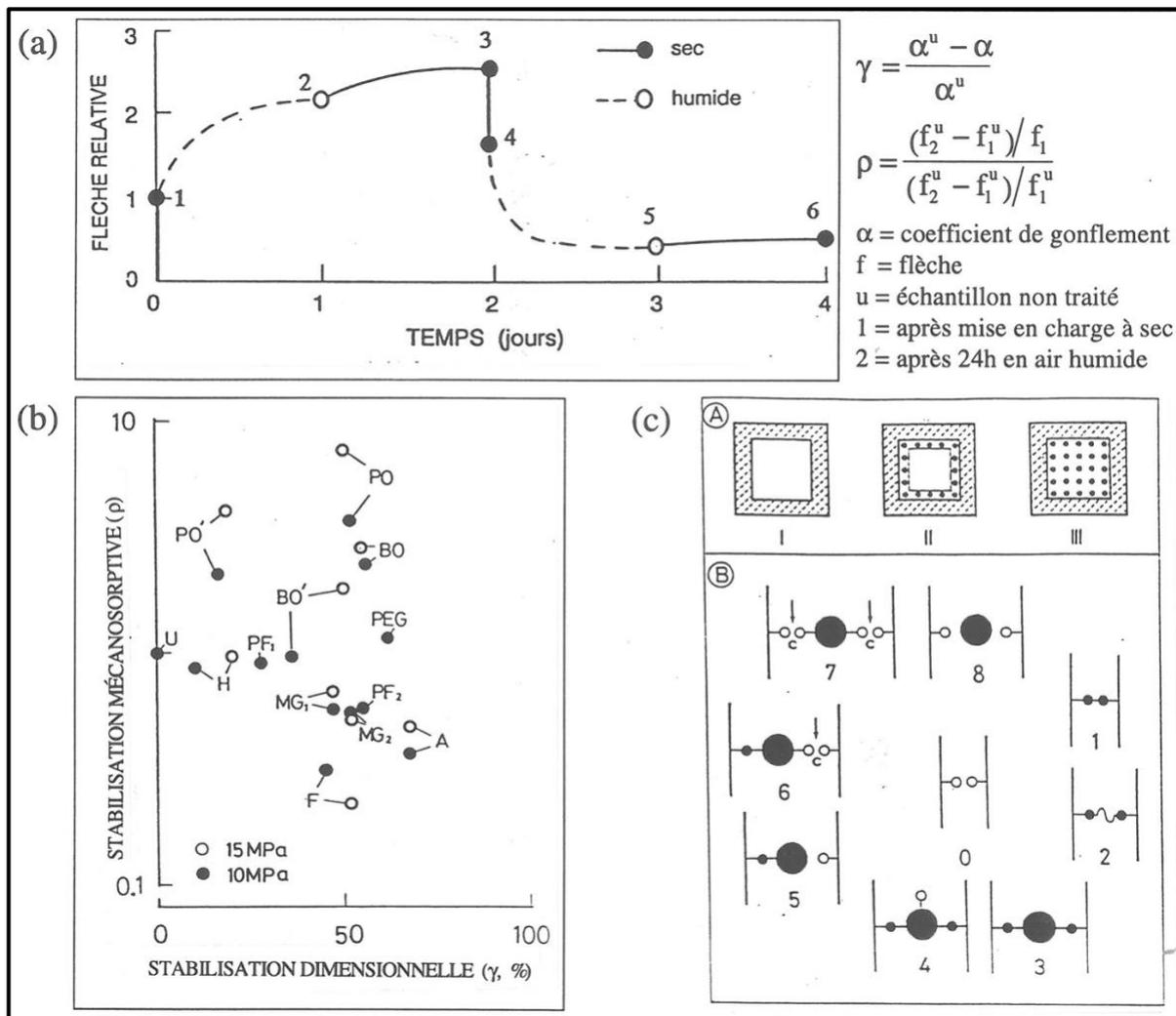


figure III- 16 : Les étapes du formage du bois à l'échelle moléculaire

Les traits épais signifient deux microfibrilles voisines reliées entre elles par des liaisons latérales. Dans l'espace de forme lenticulaire qui les sépare se trouve la matrice hydrophile, symbolisée par le ressort anguleux pour l'état vitreux, courbe pour l'état caoutchoutique (chaud et humide).

### III-3.3. LE BOIS MODIFIÉ

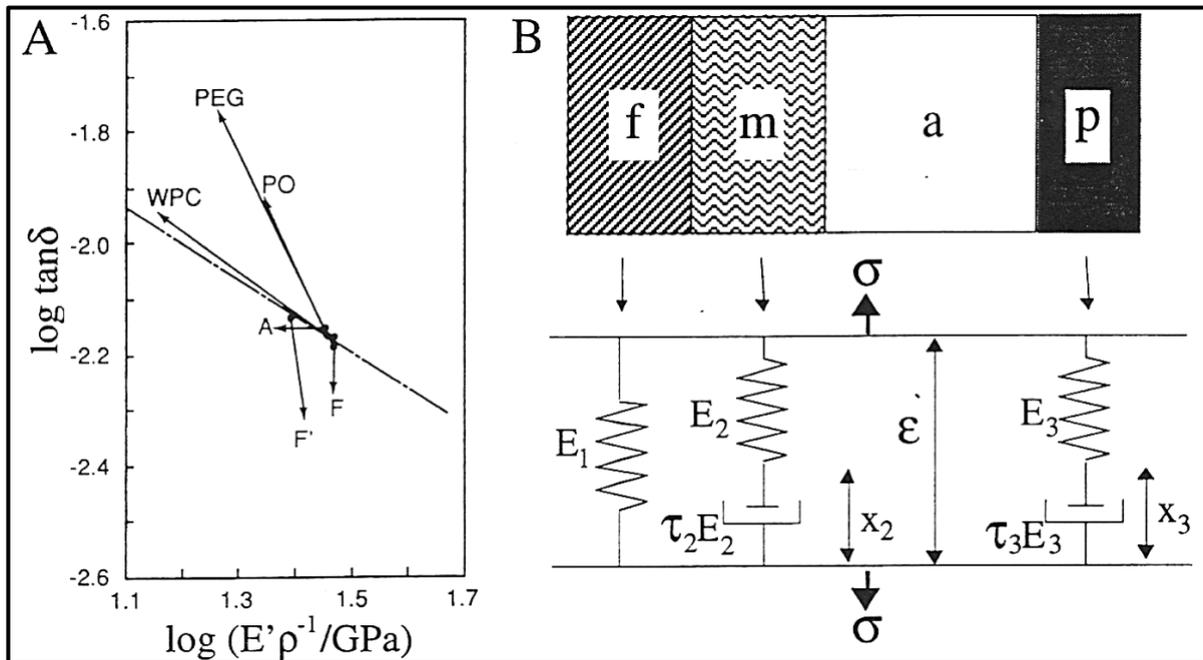
L'effet mécanosorptif peut servir à caractériser l'action d'un traitement chimique ou thermique sur le comportement rhéologique du bois. C'est ainsi qu'a été mis au point un test de référence consistant à comparer la flèche relative d'un échantillon traité et non traité, en fluage en flexion. Joint à un critère de stabilisation acoustique, ce critère appelé "efficacité anti-fluage" s'est avéré discriminant pour établir la typologie des stabilisations chimiques du bois. Il a permis d'aller au delà de la quantification conventionnelle par "efficacité anti-gonflement" basée sur des mesures de gonflement à effort nul, qui ne rend pas compte des couplages hygromécaniques notamment pour les traitements à agent gonflant hydrophile. La typologie des modifications chimiques du bois a pu ainsi être affinée [Gril et Norimoto (1990), Norimoto et Gril (1993)] (figure III-17).



**Fig. III-17 : Stabilisation chimique du bois**

(a) Obtention d'un coefficient de stabilisation mécanosorptive par un essai de fluage en flexion ; (b) relation entre stabilisation mécanosorptive ( $\rho$ ) et dimensionnelle ( $\gamma$ ). U : non traité ; H : traitement thermique ; F : formaldéhyde ; A : acétylation ; MG : maléine-glycérine ; PF : phénol-formaldéhyde ; BO : butylène oxide ; PO : propylène oxide ; PEG : polyéthylène glycol. (c) typologie basée sur la pénétration ou non des parois (A) et sur le type d'interaction chimique entre le réactif et le bois (B) : les traits verticaux symbolisent les microfibrilles, les points blancs les groupes hydroxyles de la matrice et les noirs la substitution de la liaison hydrogène par une liaison chimique, les grands ronds pleins l'action d'un agent gonflant.

La figure III-18 montre des résultats expérimentaux de modification acoustiques obtenus sur épicéa par Akitsu et al. (1993b) assortis d'une tentative de modélisation uniaxiale des propriétés viscoélastiques longitudinales des bois modifiés. Une approche similaire peut être utilisée pour rendre compte de l'effet des variations d'humidité sur le comportement du bois non traité [Akitsu et al. (1993a)]. Le modèle est basé sur une image simplifiée de la microstructure cellulaire et moléculaire : réseau de microfibrilles élastiques orienté parallèlement à l'axe des fibres (AMF=0) et noyé dans une matrice viscoélastique ; parois organisées en un nid d'abeille parfait. L'intérêt pratique du modèle est de permettre de prendre en compte, pour chaque constituant, l'influence du traitement (ou de la variation d'humidité) sur les variations dimensionnelles d'une part, sur le comportement rhéologique d'autre part.



**Fig. III-18 : Modélisation uniaxiale de la modification chimique de propriétés acoustiques**

**A :** Résultats expérimentaux sur épicéa. La ligne brisée indique la corrélation expérimentale, sur bois non traité, entre le logarithme du module spécifique ( $\log_{10} E/\rho$ ) et celui du coefficient de perte ( $\log_{10} \tan \delta$ ). La qualité acoustique du bois utilisé en lutherie pour les tables d'harmonie correspond notamment à un  $E/\rho$  élevé et un  $\tan \delta$  faible. Les flèches relient la valeur moyenne pour un groupe d'échantillons non traités à celle des mêmes traités : A : acétylation ; F : formaldéhyde ; PO : propylène oxide ; PEG : polyéthylène glycol ; WPC : composite bois-polymère (ou combinaison bois-plastique). **B :** Modèle uniaxial utilisé pour interpréter ces résultats. Le bois est supposé équivalent à un arrangement parallèle de trois composants : les microfibrilles cellulosiques (f), la matrice amorphe (m) et les lumens contenant de l'air (a). Seule la matrice (m) est concernée par la modification, tant par son comportement que ses dimensions : on suppose pour simplifier que le volume des lumens (a) reste inchangé. Dans le cas du WPC un quatrième composant, le polymère (p), occupe une partie de l'air (a). L'analogie rhéologique correspondante est montrée en dessous : Les microfibrilles sont représentées par un simple ressort  $E_1$ , la matrice par un élément de Maxwell de rigidité  $E_2$  et viscosité  $\tau_2 E_2$ , le polymère par un autre élément de Maxwell de rigidité  $E_3$  et viscosité  $\tau_3 E_3$ .

### III-3.4. RHEOLOGIE A HAUTE TEMPERATURE

Les principes généraux de l'amélioration du bois par procédés chimiques ou hygro-thermo-mécanique ont été énoncés il y a plusieurs décennies [Stamm (1964), Salmen et de Ruvo (1985), Norimoto et al. (1986)] mais ce thème fait l'objet actuellement d'un approfondissement et d'un développement important en rapport avec les progrès de la chimie et des procédés industriels. C'est le cas notamment au Japon où la demande et la valeur ajoutée du bois de qualité est particulièrement forte et où le concept de "super bois" est assimilé par le milieu industriel depuis 1989, ou encore au Danemark du fait du dynamisme de l'industrie de l'ameublement. Mais l'engouement japonais des années 80 pour les modifications chimiques du bois fait place, dans les années 90, à un intérêt croissant porté aux traitements hygrothermiques à haute température, accompagnés ou non d'action mécanique. Ce type de traitement présente l'avantage d'éviter toute pollution mais nécessite une technologie avancée (pression, micro-ondes, hyperfréquences...) de manière à obtenir rapidement des températures élevées, jusqu'à 140°C et plus, en atmosphère saturée et éventuellement en l'absence d'oxygène, permettant une modification en profondeur de la structure moléculaire sans nuire aux qualités mécaniques et physiques du matériau. Les avantages en termes de stabilité dimensionnelle, état de surface, aptitude au formage, etc., sont avérés mais les connaissances fondamentales sur la rhéologie du bois dans ces conditions "extrêmes" sont encore très insuffisantes, aussi bien au niveau des mécanismes en jeu que des lois de comportement macroscopiques. Une avancée dans ce domaine est le préalable autant que l'accompagnement indispensable d'un développement des procédés industriels.

Ce sujet fait l'objet d'un projet financé par la DERF (Ministère de l'Agriculture) et l'ADEME "Loi de comportement thermo-hygro-mécanique du bois à haute température (80 - 140°C)" que nous coordonnons, en réponse à un appel d'offre intitulé "développer des semi-produits performants et compétitifs par traitement dans la masse ou reconstitution". Le projet débutera en 1997 et durera en tout 3 ans, le financement pour la première tranche de 18 mois étant de 450 kF. Quatre laboratoires français sont concernés : le LMGC à Montpellier, le Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux, le LRSF à l'ENGREF Nancy et l'équipe Séchage du CTBA Paris. Le thème du projet est la connaissance du comportement du bois dans un domaine d'humidité, de température et de contrainte susceptible de modifier de manière partiellement irréversible le comportement rhéologique du matériau, sans toutefois nuire à ses qualités mécaniques. Nous nous sommes fixé a priori un domaine de 80 à 140°C, correspondant d'une part, au dépassement de la transition vitreuse des lignines (tout au moins aux fortes humidités) et donc à l'apparition de mécanismes de déformation complètement absents à température ambiante, d'autre part au tout début de la dégradation des hémicelluloses risquant de fragiliser le matériau. Les objectifs de l'étude sont à la fois d'obtenir des données expérimentales sur le comportement, rechercher des formulations "robustes" de la loi de comportement c'est-à-dire applicables à tout le domaine de temps/température/humidité envisagé, développer des outils numériques de simulation, proposer des pistes pour le développement préindustriel de procédés, de semi-produits et de produits.

### **CONCLUSION DE LA PARTIE III**

*La compréhension des phénomènes physiques en jeu est essentielle pour progresser dans l'étude du comportement du bois. Cela passe par une meilleure prise en compte des paramètres de structure, et nécessite l'usage d'approches micro-macro. Nous avons vu que l'extrême complexité de la microstructure de bois est compensée par un fort niveau d'organisation, ce qui canalise ces passages dans des voies privilégiées.*

*Le comportement hygrothermomécanique constitue le domaine d'application le plus remarquable des concepts de couplage et de blocage dans le bois. Si le seul effet de la température, déjà abordé dans la deuxième partie, pouvait s'analyser au moyen des outils classiques de la viscoélasticité, le couplage mécanosorptif impose de faire preuve d'inventivité.*

*La conception d'éléments rhéologiques spécifiques est le moyen qui vient le plus naturellement à l'esprit du fait que la gestion de variables internes est habituelle pour le mécanicien théoricien ou numérique. Depuis quelques années apparaissent des outils numériques opérationnels basés sur ce principe. Leurs limitations sont toutefois encore mal définies.*

*C'est précisément vers une extension du domaine de sollicitation hygrothermomécanique que doit porter l'effort des mécaniciens du bois, afin d'accompagner le développement accéléré de nouvelles technologies basées sur l'usage de la haute température.*

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le fil conducteur des travaux présentés est la notion de *blocage*, dont nous avons donné une interprétation rhéologique simple basée sur la diminution ou l'augmentation de temps caractéristiques de processus de relaxation viscoélastique. Le blocage, comme le déblocage éventuel, a toujours pour origine l'interaction entre les sollicitations mécaniques et un autre phénomène, c'est-à-dire un *couplage*.

Nous avons vu dans la première partie que l'agent du couplage peut être recherché dans les processus biochimiques mis en jeu lors de la formation du bois. Dans ce cas la source de la sollicitation mécanique est double, support des masses d'un côté et maturation du bois de l'autre. Les contraintes résiduelles ainsi générées sont favorables à l'arbre sur pied ; les blocages qui les accompagnent sont généralement la source d'ennui lors de la transformation. Nous avons vu dans la seconde partie comment analyser les conséquences technologiques de ces blocages biomécaniques, en particulier leur déblocage du fait du couplage thermomécanique dans les billons de bois vert. Enfin dans la troisième partie nous avons envisagé le bois en tant que matériau de l'ingénieur et donc généralement séché : le couplage mécanosorptif joue alors un rôle prépondérant dans la mise en place des blocages rhéologiques.

Ce passage de l'arbre vivant au bois matériau, en passant par le billon vert, se traduit par la nécessité de prendre en compte des échelles microscopiques plus fines. Cela nous a conduit, au début de la troisième partie, à proposer un schéma général des passages entre les différentes échelles d'observation dans le bois.

Revenons plus en détail sur les acquis des trois parties et sur les interrogations qu'ils peuvent susciter.

### **Viscoélasticité des contraintes de croissance et recouvrance hygrothermique**

Le choix d'une approche élastique pour décrire la mise en place des contraintes de croissance se justifie dans une large mesure par la complexité des situations rencontrées. Dans la pratique il importe surtout de pouvoir déduire, à partir de mesures périphériques de déformations résiduelles, le champ de contrainte régnant à l'intérieur des tiges à un stade donné de leur développement. Cela nécessite une théorie de la mise en place des contraintes. Or, de nombreux paramètres sont susceptibles d'intervenir, aboutissant à d'innombrables combinaisons possibles de gradients de contrainte initiale de croissance et de propriétés mécaniques. Un profil de contrainte donné peut en fait résulter de plusieurs de ces combinaisons, et cela sans forcément quitter le cadre de l'élasticité linéaire. Cela fait que du point de vue du pouvoir explicatif ou "pédagogique" de la modélisation, la prise en compte de la viscoélasticité ne présente pas un caractère de nécessité urgente.

Dans l'exemple de simulation viscoélastique décrit au § I-3.2, nous avons voulu, en plus de l'introduction d'une viscosité dans le comportement, ajouter l'effet d'un gradient radial rapide dans les premiers cernes simulant la transition entre bois juvénile et adulte. Les profils obtenus diffèrent bien de ceux fournis par les modèles habituels mais il est malaisé de distinguer ce qui

est dû aux gradients radiaux de propriétés ou à la viscosité. Ceci illustre une difficulté rencontrée pour produire des simulations à la fois réalistes et “lisibles”.

La modélisation viscoélastique des contraintes de croissance n’en demeure pas moins un sujet à approfondir et développer, et cela pour deux raisons principales.

- La réalité du comportement rhéologique du bois est mieux décrite par des modèles viscoélastiques que simplement élastiques ; plus nous disposerons de données complètes et précises, plus il faudra pour les interpréter disposer de modèles collant à cette réalité.
- Seule une approche viscoélastique est capable de décrire de manière satisfaisante les blocages biomécaniques à l’origine du phénomène de RHT.

La recouvrance hygrothermique du bois vert (RHT) a constitué un thème central et fédérateur. Ce sujet comprend en effet de multiples aspects qui le relie aux principales thématiques de la science du bois :

- Du côté de la mécanique de l’arbre et de l’étude du fonctionnement du cambium, la RHT occupe une place de choix du fait qu’elle offre la perspective de pouvoir remonter aux conditions mécaniques de la formation du bois (§ II-1.4). Elle est de toute manière associée étroitement à la modélisation viscoélastique des contraintes de croissance comme l’illustre la simulation du § I-3.2.
- Par ses conséquences sur la fissuration à cœur des grumes étuvées, elle concerne les technologies de transformation, en tout premier lieu le déroulage rendu malaisé par les fentes en bout de grume ; ce problème a été abordé dans le cadre du projet “billon” détaillé dans l’ensemble de la partie II. Inversement, nous avons vu au § II-3.3 comment les effets de la RHT dans les directions transverses aux fibres peuvent être mis à profit pour contrebalancer ceux du séchage, ce qui ouvre des perspectives intéressantes pour la valorisation des bois ronds.
- Enfin du côté de la connaissance du matériau, elle est indissociable d’une approche rhéologique renseignant sur l’activation thermique des processus de déformation viscoélastique (§ II-1.1). Mais l’enjeu de cette recherche est aussi de disposer d’informations sur l’état initial du matériau : la mise en place des blocages durant la formation du bois, comme d’ailleurs durant le séchage, nécessite d’ailleurs une étude à tous les niveaux structurels évoqués au § III-1.1.

L’hypothèse d’équivalence rhéologique entre un hypothétique comportement “moyen équivalent” de la maturation et celui du bois chaud et humide, évoquée au § II-1.4, devrait être testée expérimentalement. Il faudrait disposer pour cela de jeux de données fournissant d’une part les déformations résiduelles instantanées et hygrothermiques dans les directions T et L, d’autre part la loi de comportement multiaxiale viscoélastique, pour du bois de formation récente.

L’hypothèse selon laquelle les cinétiques de déformation thermique du bois vert pourraient permettre de remonter, par un calcul viscoélastique inverse, à la “préhistoire” rhéologique du matériau, a été émise à partir d’une relecture des expériences préliminaires de RHT sur jujubier décrites au § II-1.3. Il s’agit là aussi d’une idée forte mais risquée, qui mériterait d’être testée par une nouvelle campagne d’essais conçus dès le départ dans cette optique.

### **Les suites du projet “billon”**

L’objectif des travaux sur le comportement thermomécanique d’un billon était de mettre en place un outil numérique intégré capable de prédire à la fois la diffusion de la chaleur et l’évolution du champ de contrainte dans une portion de grume soumise à un chargement thermique. Le bois est supposé demeurer à l’état vert, de sorte que les principales sources de

contraintes sont la croissance et le phénomène de recouvrance hygrothermique. Rappelons les deux applications principales de cette recherche :

- Amélioration des procédures d'étuvage humide pratiquées en préalable à l'usinage ;
- valorisation des bois ronds pour lesquels le traitement thermique est susceptible d'apporter un gain de qualité, notamment par le comportement au séchage.

Au LMGC et au CIRAD Forêt de nombreuses données expérimentales ont été accumulées depuis 1989 grâce au programme "ASMA" (Architecture, Structure et Mécanique de l'Arbre) suivi à partir de 1992 par le programme "Billon" (Comportement thermomécanique d'une portion de tronc d'arbre. Application à la gélivure et à l'étuvage). Elles concernent principalement la mesure des déformations bloquées, sur lesquelles les informations faisaient cruellement défaut au départ et que l'on sait maintenant acquérir au moyen de trois types de procédures éprouvées :

- mesures sur pied en périphérie des tiges : méthode du trou et des deux rainures, pour la déformation résiduelle longitudinale uniquement ;
- expérimentation sur rondelles, soit initialement intactes pour observation de la fissuration soit prédécoupées pour permettre l'expression libre des déformations, donnant accès à des informations globales sur le niveau de déformations bloquées transversalement aux fibres ;
- mesures sur placages de déformations dans le plan tangentiel (LT), qu'il s'agisse de RHT ou de retrait de séchage, permettant l'observation de gradients transverses de propriétés (de nature mécanique mais aussi physiques, chimique, esthétiques...).

Durant la période officielle du programme "Billon" (1992-1996), une part importante des efforts a porté sur la mise au point de procédures expérimentales permettant l'acquisition de données complémentaires sur les déformations bloquées. Les modules numériques thermomécaniques proprement dits ne sont pas achevés. Pour mener à bien le projet, il faudrait :

- Passer pour le calcul de l'état mécanique initial, de l'hypothèse de contraintes planes à celle des déformations planes généralisées ;
- Introduire un comportement viscoélastique dans le module mécanique de manière à rendre compte correctement de l'activation thermique ;
- Coupler réellement le calcul mécanique viscoélastique au module de diffusion thermique mis au point par P. Perré de l'ENGREF Nancy et donnant en sortie l'évolution temporelle des cartes de température ;
- Envisager le cas échéant la prise en compte d'un couplage thermomécanique complet, dans lequel l'effet des sources de chaleur induites par les processus de déformation n'est pas supposé négligeable par rapport à la diffusion thermique.

Dans la version initiale du projet, il n'était pas prévu d'aborder le problème de la fissuration : nous avons proposé dans le chapitre II-2 une manière de l'y inclure. Les simulations préliminaires pour la rondelle présentées au § II-3.8 ouvrent un thème de recherche prometteur, l'objectif étant de valider l'expérimentation sur rondelles pour prédire la réaction de l'extrémité des grumes ou des poteaux à l'étuvage :

- La définition expérimentale de l'indice de fissuration pour l'extrémité d'une grume ou une rondelle pourrait être affinée, en tenant compte des différents modes de fissuration observés (roulure, fente radiales, combinaison des deux) ;

- Le passage au calcul numérique 3D (ou 2D pour une rondelle) est inévitable pour traiter ces problèmes mécaniques du fait de la perte d'axisymétrie ; on sait de toutes manières que les situations générant de forts taux de fissuration sont associées à la présence de secteurs de bois de réaction, problème non axisymétrique par excellence.
- Il faudra mener en parallèle des mesures expérimentales de validation, en comparant à chaque fois la fissuration de l'extrémité de la grume et celle d'une rondelle prélevée à cette extrémité.

Pour alimenter les modèles numériques, l'acquisition de données expérimentales sur le comportement est indispensable. Outre les méthodes classiques de caractérisation physique et mécanique on dispose maintenant à Montpellier des procédures suivantes :

- mesure de résistance radiale par flexion de barrettes développée en vue des études sur la roulure par Chanson et al. (1989) ;
- mesure par vibration libre sur barreaux mise au point par Bordonné (1989) pour la mesure de la rigidité longitudinale ;
- évaluation de l'énergie surfacique de rupture par flexion d'une éprouvette entaillée adaptée par Baillères (1994) ;
- influence de la température sur les paramètres pertinents pour l'étude du processus de coupe par déroulage par Beauchêne (1996)

Ces techniques expérimentales, malgré la richesse des informations qu'elles peuvent fournir, restent néanmoins insuffisantes. Il faudrait disposer de plus de données sur le comportement multiaxial élastique, viscoélastique et ultime, ainsi que sur les comportements des constituants microscopiques. Deux stratégies peuvent être adoptées pour pallier ce manque. On peut soit tirer profit des méthodes mise au point ailleurs en développant les échanges scientifiques correspondants (par exemple avec le LRSF à Nancy pour la micromécanique, le LRBB pour la rhéologie multiaxiale, les Mines de Saint Etienne pour les traitements à haute température...), soit développer localement de nouvelles compétences. Il nous semble opportun de progresser en tenant compte de trois critères :

- faire évoluer, pour en tirer le meilleur parti possible, les procédures qui nous sont propres, telles que les mesures sur rondelles ou sur placages ;
- rechercher l'intégration des données, c'est-à-dire disposer de jeux de données sur tous les aspects du comportement et des états initiaux pour un matériel végétal donné et bien identifié ;
- inversement il faut savoir tirer profit de la diversité des plans ligneux fournie par les bois tropicaux pour appréhender la multiplicité des stratégies réalisées par le bois pour remplir ses fonctions dans l'arbre.

### **Le couplage hygrothermomécanique**

Après l'étuvage humide vient naturellement la question du séchage. On sait que le problème posé par le séchage ne se limite pas à la gestion correcte du transfert de masse et de chaleur : les déformations qu'il induit, collapse dans la phase initiale ou retrait une fois atteint le domaine hygroscopique, sont la source de nombreux ennuis. Les aspects mécaniques sont donc fortement présents dans la mise en œuvre du séchage du bois. Ceci est autant valable du point de vue de la pratique que de celui de la modélisation, et s'applique plus généralement à toute situation où une pièce de bois est soumise à des variations d'ambiance hygrothermique.

L'étude du couplage mécanosorptif est en plein essor notamment sous l'impulsion du COST 508 "Wood mechanics" (1990-1996) ; toutefois toute la lumière n'est pas encore faite sur cette question. Il reste du travail à accomplir à plusieurs niveaux :

- Nous avons vu au § III-2.2 que des lois de comportement mécanosorptives opérationnelles sont maintenant proposées par divers auteurs. Par exemple en France on dispose au LRBB d'un modèle numérique 3D mis au point par T. Toratti et au LRSF (ENGREF Nancy) d'un code 2D développé par Mauget (1996), ce dernier étant capable de prendre en compte les grands déplacements. Ce développement va probablement se poursuivre dans les années qui viennent pour aboutir à des codes de calculs contenant des lois de comportement collant de mieux en mieux à la réalité. Il devra être accompagné par un effort théorique portant autant sur le fondement thermodynamique des lois retenues que sur la convergence des algorithmes numériques.
- Au niveau expérimental, les limites d'application de la notion de déformation de fluage limite, de même que sa quantification, pourraient être abordées par les procédures "multi-palier" mentionnées au § III-2.4. Un test tel que celui montré au § III-3.3 pour caractériser la stabilisation mécanosorptive par traitements chimiques, pourrait inspirer des méthodes de caractérisation rapide du comportement à long terme. Associé à d'autres tests tels le séchage dissymétrique, ce type de procédure devrait aboutir dans l'avenir à une nouvelle conception de la caractérisation mécanique systématique des bois, incluant l'acquisition de paramètres de lois de comportement mécanosorptives.
- La modélisation du comportement a aussi un rôle à jouer en vue de la compréhension des mécanismes en jeu. Il peut s'agir de modèles basés sur des passages "micro-macro", tirant parti des niveaux successifs d'organisation structurelle. Il faudrait en particulier déterminer le rôle joué par les interactions entre couches de la paroi, par rapport à celui habituellement invoqué des interactions entre réseau microfibrillaire et matrice. Les modèles basés sur les concepts de vieillissement physique, ou les hygro-verrous pour représenter l'idée de reports de contrainte, représentent des pistes possibles.

Tous ces aspects sont présents dans le projet DERF "Loi de comportement thermo-hygro-mécanique du bois à haute température" (1997-1999) que nous coordonnons. L'une des questions que l'on se pose à propos de la haute température concerne l'existence ou tout au moins l'importance de l'effet mécanosorptif. On sait en effet qu'à basse température, l'existence de la mécanosorption est avérée et se traduit par des niveaux de déformation bien plus importants qu'en fluage "pur" à humidité constante. Or, le fluage du bois saturé peut atteindre des niveaux considérables à haute température : on peut se demander si des mécanismes de déformation nouveaux sont vraiment induits par mécanosorption. Outre l'intérêt pratique de ce domaine de recherche, il se peut que l'ampleur plus grande des phénomènes à plus haute température permette d'avancer de manière significative dans la compréhension des mécanismes physiques en jeu.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akitsu A., Gril J., Norimoto M. (1993a) *Modelling the action of water on Dynamic mechanical properties of wood*, Wood research, Bulletin of the Wood research Institute, Kyoto University, Japan, vol. 79, p. 52-53.
- Akitsu A., Gril J., Norimoto M. (1993b) *Uniaxial modelling of vibrational properties of chemically modified wood*, Mokuzai Gakkaishi, vol. 39, n° 3, p. 258-264.
- Archer R.R. (1986) *Growth stresses and strains in trees.*, Ed., in: Springer Series in Wood Science, E. Timell (ed), Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- Armstrong L.D. (1972) *Deformation of wood in compression during moisture movement*, Wood Science, vol. 5, 2, p. 81-86.
- Armstrong L.D. (1983) *Mechanosorptive deformations in collapsible and non collapsible species of wood*, Journal of the Institute of Wood Science, 13, p. 206-211.
- Back E.L., Salmén L., Richardson G. (1983) *Transient effects of moisture sorption on the strength properties of paper and wood-based materials*, Svensk papperstidning, vol. 6-1983, 86, p. R61-71.
- Baillères H. (1994) *Précontraintes de croissance et propriétés mécano-physiques de clones d'Eucalyptus (Pointe Noire - Congo) : hétérogénéités, corrélations et interprétations histologiques*, Thèse de l'Université de Bordeaux I, dir. D. Guitard, B. Thibaut.
- Bamber R.K. (1978) *The origin of growth stresses*, Wood qualification and utilization of tropical species (IUFRO Conference), Laguna, Philippines, Forestry Commission of N.S.W, Sydney (pub.), reprint no 715 WT (revised 1980).
- Bazant Z.P. (1985) *Constitutive equation of wood at variable humidity and temperature*, Wood Science Technology, vol. 19, p. 159-177.
- Beauchêne J. (1996) *Evolution du comportement mécanique du bois vert avec la température. Application à l'étude du déroulage et du tranchage de quelques bois guyanais*, Thèse de l'Engref en Sciences du bois, dir. B. Thibaut, Kourou, Guyane, 30.4.96.
- Berrada E. (1991) *Recouvrance Hygro-Thermique du bois vert*, Thèse de l'Université Montpellier 2.
- Blaise F. (1995) *Simulation du parallélisme dans la croissance des plantes et applications*, Thèse de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- Bordonné P.A. (1989) *Module dynamique et frottement intérieur dans le bois: mesures sur poutres flottantes en vibrations naturelles*, Thèse de Doctorat en Sciences du Bois, Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Boyd J.D. (1972) *Tree growth stresses, part V: Evidence of an origin in differentiation and lignification*, Wood Science and Technology, vol. 6, p. 251-262.
- Boyd J.D. (1982) *An anatomical explanation of visco-elastic and mechanosorptive creep in wood, and effects of loading rate on strength*, in: New Perspectives in Wood Anatomy, P. Baas (ed), Martinus Nijhoff and Dr. W. Junk, La Hague, p. 171-222.
- Brandão A. (1996) *Classification des bois tropicaux vis-à-vis du séchage : la méthode "flying wood"*, Thèse de l'ENGREF, Nancy, 2.10.96.
- Cave (1968) *The anisotropic elasticity of the plant cell wall*, Wood Science and Technology, vol. 2, 4, p. 268-278.
- Chanson B., Gril J. (1991) *Mécanique de l'arbre et mécanique du bois*, 3ème Séminaire Architecture, Structure et Mécanique de l'Arbre, ENGREF, Montpellier, 2.91, B. Thibaut (ed), LMGC, Université Montpellier 2 (pub.), p. 160-164.
- Chanson B., Leban J.M., Thibaut B. (1989) *La roulure du châtaignier (Castanea sativa Mill.)*, Forêt Méditerranéenne, vol. 11, n° 1, p. 15-34.
- Dabadie P. (1991) *Contribution à la modélisation et simulation de la croissance des végétaux*, Thèse de l'Université Montpellier 2.
- Eyring H. (1936) *Viscosity, plasticity and diffusion as examples of absolute reaction rate*, Journal of Chemical physics, vol. 4, p. 283-291.
- Fourcaud T. (1995) *Analyse du comportement mécanique d'une plante en croissance par la méthode des éléments finis*, Thèse de l'Université de Bordeaux I.
- Fournier M. (1989) *Mécanique de l'arbre sur pied : maturation, poids propre, contraintes climatiques dans la tige standard*, Thèse de l'INPL, Nancy.
- Fournier M. (1994) *Biomécanique des végétaux*, Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université Bordeaux 1.

- Fournier M., Chanson B., Guitard D., Thibaut B. (1991a) *Mécanique de l'arbre sur pied: modélisation d'une structure en croissance soumise à des chargements permanents, évolutifs. Partie 1: application à l'analyse des contraintes de support*, Annales des Sciences Forestières, vol. 48, n° 5, p. 513-526.
- Fournier M., Chanson B., Thibaut B., Guitard D. (1991b) *Mécanique de l'arbre sur pied: modélisation d'une structure en croissance soumise à des chargements permanents, évolutifs. Partie 2: application à l'analyse tridimensionnelle des contraintes de maturation*, Annales des Sciences Forestières, vol. 48, n° 5, p. 527-546.
- Freudenberg K. (1964) *The formation of lignin in the tissue and in vitro*, in: The formation of wood in forest trees, M.H. Zimmermann (ed), Academic Press, New York, London, p. 203-218.
- Fukushima K. (1990) *Studies on the formation and structure of lignin in tree xylem by microautoradiography*, PhD, Faculty of Agriculture, Nagoya University.
- Génevaux J.M. (1989) *Le fluage à température linéairement croissante*, Thèse de l'INPL, Nancy.
- Gibson L.J., Ashby M.F. (1988) *Cellular Solids, Structure and Properties*, Pergamon Press.
- Goring D.A.I. (1963) *Thermal softening of lignin, hemicellulose and cellulose*, Pulp and Paper mag. Canada, vol. 64, p. T517-527.
- Gril J. (1986) *A uniaxial model for hygro-thermo-mechanical loadings of wood*, Thermomechanical Couplings in Solids, IUTAM, Jean Mandel Memorial Symposium, Paris, 5.9.86, H.D. Bui, Q.S. Son (eds), Elsevier Science (pub.).
- Gril J. (1988) *Une modélisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure*, Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Gril J. (1989) *Les mécanismes physico-mécaniques sources de grandes déformations du bois vert*, 2ème séminaire du Groupement Scientifique Rhéologie du Bois, Nogent sur Vernisson, GS Rhéologie et Mécanique du Bois (ed), p. 16-19.
- Gril J. (1991a) *Maturation et viscoélasticité du bois en croissance et recouvrance hygrothermique*, 3ème Séminaire Architecture, Structure et Mécanique de l'Arbre, ENGREF, Montpellier, 2.91, B. Thibaut (ed), LMGC, Université Montpellier 2 (pub.), p. 153-158.
- Gril J. (1991b) *Mechanosorption, microstructure and wood formation*, Fundamental aspects of the creep in wood (COST 508 "Wood mechanics" Workshop), Lund University, Suède, 20-21.3.91, A. Martenson, A. Ranta-Maunus (eds), EEC DGXII (pub.), p. 128-142.
- Gril J. (1992) *Rheology of in-tree wood and hygrothermal recovery*, IUFRO All Division 5 conference, Nancy, 23-28.8.92, ARBOLOR (ed), p. 185.
- Gril J., Berrada E., Thibaut B. (1993a) *Recouvrance hygrothermique du bois vert. II. Variations dans le plan transverse chez le châtaignier et l'épicéa et modélisation de la fissuration à coeur provoquée par l'étuvage*, Annales des Sciences Forestières, vol. 50, p. 487-508.
- Gril J., Berrada E., Thibaut B., Martin G. (1993b) *Recouvrance hygrothermique du bois vert. I. Influence de la température. Cas du jujubier (Ziziphus lotus L. Lam.)*, Annales des Sciences Forestières, vol. 50, p. 57-70.
- Gril J., Cordier A. (1995) *La recouvrance hygrothermique comme marqueur rhéologique du bois de tension*, 8ème Séminaire Architecture, Structure et Mécanique de l'Arbre, CIRAD, Montpellier, 12-13.7.95, B. Thibaut (ed), LMGC, Université Montpellier 2 (pub.), p. 79-85.
- Gril J., Fournier M. (1993) *Contraintes d'élaboration du bois dans l'arbre: un modèle multicouche viscoélastique*, 11ème Congrès Français de Mécanique, Lille-Villeneuve d'Ascq, 06-10.9.93, Association Universitaire de Mécanique (ed), vol. 4, p. 165-168.
- Gril J., Fournier M., Blaise F. (1992) *Introduction de concepts mécaniques dans un logiciel de simulation de croissance des plantes*, 4ème Séminaire Architecture, Structure et Mécanique de l'Arbre, ENGREF, Montpellier, 24-25.2.92, B. Thibaut (ed), LMGC, Université Montpellier 2 (pub.), p. 171-185.
- Gril J., Jullien D. (1996) *Recouvrance hygrothermique du bois vert et fissuration à coeur des grumes*, 4ème Colloque Sciences et Industries du Bois, Nancy, 11-13.9.96, Haluk (ed), ARBOLOR (pub.), p. 141-148.
- Gril J., Norimoto M. (1990) *Propriétés rhéologiques du bois modifié par traitement chimique*, "Rhéologie des Matériaux du génie Civil", 25ème Congrès du Groupe Français de Rhéologie, Grenoble, 28-30.11.90, in: Les Cahiers de Rhéologie, n° 4, p. 258-269.
- Grossman P.U.A. (1978) *Mechanosorptive behavior. In: General constitutive relations for wood and wood-based materials*, WSF Workshop, Syracuse University, 7.78, p. 313-25.
- Grzeczynsky (1962) *Einfluß der Erwärmung im Wasser auf vorübergehende und bleibende Formänderungen frischen Rotbuchenholzes*, Holz als Roh- und Werkstoff, vol. 20, 6, p. 210-216.
- Guitard D., El Amri F. (1987) *Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux*, Annales des Sciences Forestières, vol. 4, 3, p. 335-358.
- Hallé F., Oldeman R.A.A. (1970) *Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux*, in: Collection de monographies et de biologie végétale, 6, Masson, Paris.

- Hanhijärvi A. (1995) *Modelling of creep deformation mechanism in wood*, Doctor of Technology, Helsinki University of Technology, Finland.
- Hunt D., Gril J. (1996a) *Evidence of a physical aging phenomenon in wood*, Journal of Materials Science Letters, vol. 15, p. 80-82.
- Hunt D., Gril J. (1996b) *Possible contribution of fibre slippage to the longitudinal creep of wood*, Service life assessment of wooden structures, with special emphasis on the effect of load duration in various environments (4th COST 508 Wood Mechanics workshop), Espoo, Finland, 18-19.5.94, A. Ranta-Maunus (ed), EC DGXII (pub.), p. 69-81.
- Hunt D.G. (1990) *Longitudinal shrinkage-moisture relations in softwood*, Journal of Materials Science, vol. 25, p. 3671-3676.
- Hunt D.G. (1996) *Application of the physical aging theory and a hygrolock theory to mechanosorptive creep.*, 1996 International Conference on Wood Mechanics, Stuttgart, Germany, 14-16.5.96, S. Aicher (ed), FMFA-Otto-Graf-Institut (pub.), p. 35-45.
- Hunt D.G., Balsan E. (1996) *Why old fiddles sound sweeter*, Nature, vol. 379, 22/2/1996.
- Hunt D.G., Darlington (1980) , Polymer, vol. 21, 502-508.
- Hunt D.G., Shelton C.F. (1988) *Longitudinal moisture-shrinkage coefficients of softwood at the mechano-sorptive creep limit*, Wood Science and Technology, 22, p. 199-210.
- Inoue M., Aoki T., Egawa G. (1992) *Development of a new teaching material utilizing recovery of compressive set of wood*, Wood Research and Technical Notes, Kyoto University, vol. 28, p. 59-71.
- Jullien D. (1995) *Analyse expérimentale et numérique des contraintes résiduelles dans un matériau élastique orthotrope élaboré par couches successives. Cas d'un disque de bois vert*, Thèse de l'Université Montpellier 2.
- Jullien D., Gril J. (1996) *Mesure des déformations bloquées dans un disque de bois vert. Méthode de la fermeture*, Annales des Sciences Forestières, vol. 53, 5, p. 955-966.
- Kauman W.G. (1966) *On the deformation and setting of the wood cell-wall*, Holz als Roh- und Werkstoff, vol. 24, 11, p. 551-556.
- Kollmann F. (1963) *Zur theory der sorption*, Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, vol. 29, 2, p. 33-41.
- Kübler H. (1959) *Studies on growth stresses in trees : 1-2-3*, Holz als Roh- und Werkstoff, vol. 17, p. 1-9, 44-54, 77-86.
- Kübler H. (1973a) *Hygrothermal recovery under stress and release of inelastic strain*, Wood Science, vol. 6, 1, p. 78-86.
- Kübler H. (1973b) *Role of moisture in hygrothermal recovery of wood*, Wood Science, vol. 5, 3, p. 198-204.
- Kübler H. (1987) *Growth stresses in trees and related wood properties*, Forest Products Abstracts, vol. 10, 3, p. 61-119.
- Kübler H., Chen T.H. (1975) *Prevention of crosscut and heating heart checks in log ends*, Wood Science and Technology, vol. 9, 1, p. 15-24.
- Mabille F. (1994) *Recouvrance hygrothermique du bois vert et modélisation viscoélastique des contraintes de croissance*, 7ème Séminaire Architecture, Structure et Mécanique de l'Arbre, Montpellier, 5-7.4.94, B. Thibaut (ed), LMGC, Université Montpellier 2 (pub.), p. 83-92.
- Mark R.E. (1967) *Cell wall mechanics of tracheids*, Yale University Press.
- Mark R.E. (1972) *Mechanical behavior of the molecular components of fibers*, in: Theory and design of wood and fiber components of fibers, Syracuse, USA.
- Mårtensson A. (1992) *Mechanical behaviour of wood exposed to humidity variations*, Thèse Université de Lund, Suède.
- Mauget B. (1996) *Simulation en grands déplacements du comportement mécanique du bois - Application au séchage sous charge dissymétrique et séchage sous charge*, Thèse de l'INPL, Nancy.
- Mukudai J., Yata S. (1986) *Modelling and simulation of viscoelastic behaviour (tensile strain) of wood under moisture change*, Wood Science Technology, vol. 20, p. 335-348.
- Norimoto M., Gril J. (1989) *Wood bending using microwave heating*, Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, vol. 24, n° 4, p. 203-212.
- Norimoto M., Gril J. (1993) *Structure and properties of chemically treated wood*, in: Recent Research on Wood and Wood-based materials, N. Shiraiishi, H. Kajita, M. Norimoto (eds), Vol. Current Japanese Materials Research, 11, Elsevier Applied Science, p. 135-154.
- Norimoto M., Takabe K. (1985) *On Noncrystalline Structure of Wood*, Wood Research and Technical Notes, vol. 21, p. 96-101.
- Norimoto M., Tanaka F., Ohogama T., Ikimune R. (1986) *Specific Dynamic Youngs Modulus and Internal Friction of Wood in the Longitudinal Direction*, Wood Research and Technical Notes, vol. 22, p. 53-65.

- Ranta-Maunus A. (1975) *The viscoelasticity of wood at varying moisture content*, Wood Science and Technology, vol. 9, p. 189-205.
- Roland J.C., Reis D., Vian B., Satiat-Jeunemaitre B., Mosiniak M. (1987) *Morphogenesis of plant cell walls at the supramolecular level: Internal geometry and versatility of helicoidal expression*, Protoplasma, vol. 140, p. 75-91.
- Salin (1992) *Numerical prediction of checking during timber drying and a new mechanosorptive model*, Holz als Roh- und Werkstoff, vol. 50, p. 195-200.
- Salmen L. (1984) *Viscoelastic properties of in situ lignin under water-saturated conditions*, Journal of Material Science, vol. 19, p. 3090-3096.
- Salmen L. (1990) *Thermal expansion of water-saturated wood*, Holzforschung, vol. 44, 1, p. 17-19.
- Salmen L., de Ruvo A. (1985) *A model for the prediction of fiber elasticity*, Wood and Fiber Science, vol. 17, 3, p. 336-350.
- Salmen L., Kolseth P., de Ruvo A. (1985) *Modelling the softening Behaviour of wood fibres*, Journal of Pulp and Paper Science, vol. 11, 4, p. J102-107.
- Schniewind A.P. (1968) *Recent progress in the study of the rheology of wood*, Wood Science and Technology, vol. 2, p. 188-206.
- Schniewind A.P. (1972) *Elastic behavior of the wood fiber*, in: Theory and design of wood and fiber components of fibers, Syracuse, USA.
- Sharma S.N., Bali B.I., Lohani R.C. (1978) *Abnormal dimensional changes on heating green sal (Shorea robusta)*, Wood Science, vol. 10, 3, p. 142-150.
- Siau J.F. (1984) *Transport processes in wood*, in: Springer Series in Wood Science, T.E. Timell (ed), Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- Stamm A.J. (1964) *Wood and Cellulose Science*, The Ronald Press CO, New York.
- Takamura N. (1968) *Studies on hot pressing and drying process in the production of fibreboard, III : softening of fibre components in hot pressing of fibre mat*, Mokuzai Gakkaishi, vol. vol. 14, n° 2, p. 74-79.
- Takemura T. (1966) *Plastic properties of wood in relation to the non-equilibrium states of moisture content I*, Memoirs of the College of Agriculture, Kyoto University, vol. 88.
- Théry I., Gril J., Bertaux J., Meignen L., Vernet J.L. (1995) *Lignites used as fuel by prehistorics in the mousterian site of Les Canalettes and Les Usclades (L'Hospitalet, Aveyron, France)*, Nature, vol. 373, p. 480-481.
- Thibaut B. (1988) *Le processus de coupe du bois par déroulage*, Thèse de Doctorat d'Etat, dir. O. Maisonneuve, Université Montpellier 2, 367 p.
- Thibaut B. (1994) *Coordination et édition des Actes. Actes du Colloque Biomécanique des Végétaux (Colloque Interdisciplinaire du Comité de la Recherche Scientifique)*, Elsevier, Paris.
- Toratti T. (1992) *Creep of timber in a variable environment*, Doctor of Technology, Helsinki University of Technology, Finland.
- van Der Put T.A.C.M. (1994) *Deformation kinetics*, in: Creep in Timber Structure, P. Morlier (ed), Spon, Chapman & Hall, London, p. 61-72.
- Vanek M. (1986) *Regelung des Holztrocknungsprozesses mit hilfe von Trocknungsspannungen*, Thèse de doctorat, Universität für Bodenkultur, Vienne, Autriche.
- Yamada (1963) *Sorption et anisotropie viscoélastique du bois (en jap.)*, Zairyou, vol. 12, 121, p. 745-748.
- Yokota, Tarkow (1962) *Changes in dimension on heating green wood*, Forest Products Journal, vol. 12, 1, p. 43-45.