



HAL
open science

Enquête sur le comportement paradoxal du bois de tension

Bruno Clair

► **To cite this version:**

Bruno Clair. Enquête sur le comportement paradoxal du bois de tension. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2009. tel-00818173

HAL Id: tel-00818173

<https://theses.hal.science/tel-00818173>

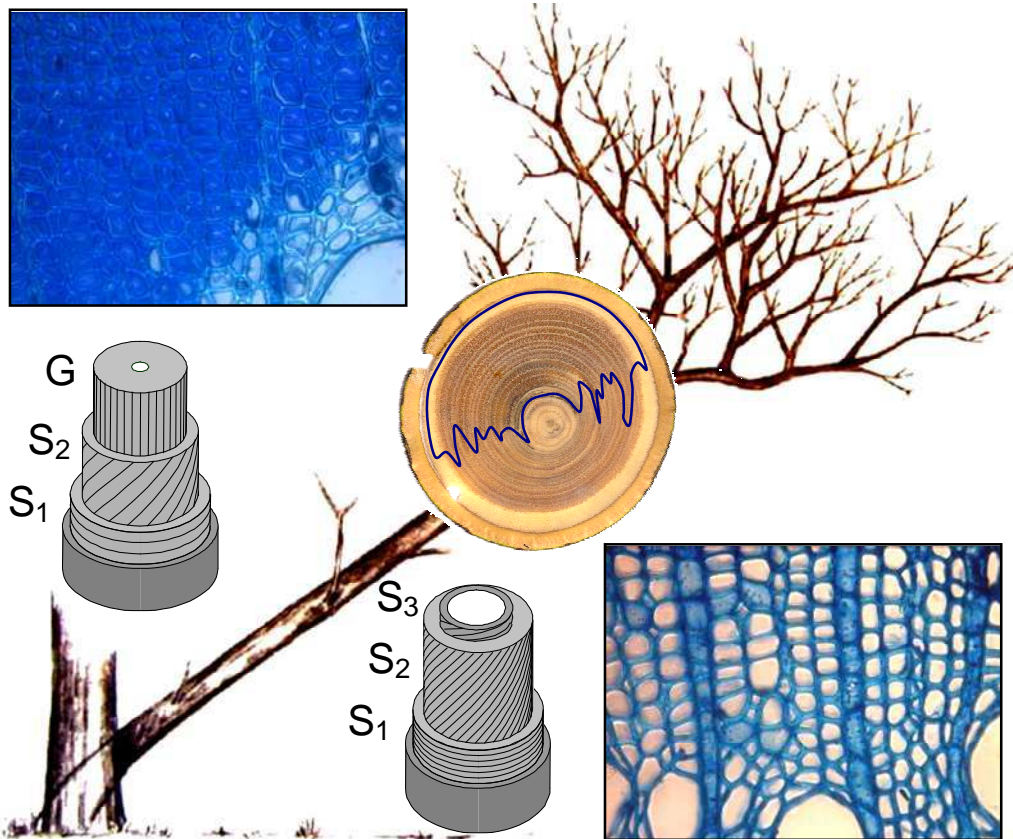
Submitted on 30 Apr 2013

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.

ENQUETE SUR LE COMPORTEMENT PARADOXAL

DU BOIS DE TENSION



Mémoire présenté à l'Université Montpellier 2 par **BRUNO CLAIR**
pour l'obtention de l'**HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES (HDR)**

le 4 septembre 2009

Composition du Jury :

David DUREISSEIX	Professeur, LMGC, Université Montpellier 2	
Joseph GRIL	Directeur de Recherche, LMGC, CNRS Montpellier	
François HILD	Professeur, LMT, ENS Cachan	Rapporteur
Patrick PERRE	Professeur, AgroParisTech Engref	Rapporteur
Gilles PILATE	Directeur de Recherche, INRA Orléans	Rapporteur
Bernard THIBAUT	Directeur de Recherche, EcoFoG, CNRS Kourou	

SOMMAIRE

<i>Avant-propos</i>	4
<i>Contexte et enjeux</i>	5
Biomécanique de l'arbre.....	5
Matériau bois.....	5
A l'interface entre le bois dans l'arbre et le bois matériau.....	6
<i>Présentation générale synthétique des activités de recherche</i>	7
Caractérisation de l'état mécanique de la fibre et genèse des contraintes de croissance.....	9
Comportement hygro-mécanique.....	10
<i>Enquête sur les origines microscopiques du retrait paradoxal du bois de tension</i>	16
De nombreuses victimes et quelques suspects (Etat de l'art avant 2001).....	16
1998 : contre-enquête.....	17
2 alibis démontés	18
Suspect n°1 : la cellulose.....	20
Enquête sur la composante non-cellulosique de la couche G.....	21
Quand "los tropicanos" jouent les trouble-fêtes	22
Un second coupable.....	22
<i>Comment j'envisage la suite</i>	25
<i>Copie des articles cités</i>	27

AVANT-PROPOS

Je m'étais fait une grande idée de ce que pouvait être une HDR, un document de synthèse de plusieurs années de recherche rassemblées dans un document publiable. C'était une fausse idée, l'HDR n'est pas une thèse d'état... dommage ?

Le document qui suit n'est donc pas ce travail de synthèse que j'aurais aimé faire dans quelques années mais un rapport pour convaincre le jury que je suis apte à diriger des recherches, à encadrer des étudiants, à définir une politique scientifique.

Cette aptitude s'est forgée grâce à l'accueil et la patience des directeurs de recherche qui m'ont encadré successivement : Bernard Thibaut, Meriem Fournier, Junji Sugiyama et aujourd'hui Joseph Gril. Je les remercie chacun. Avec leurs différences, ils ont façonnés mon esprit scientifique, ma curiosité et ma rigueur. Ils m'ont fait progresser dans mes connaissances théoriques et mon savoir faire expérimental. Ils m'ont fait appréhender la difficulté de gestion des relations humaines.

Ce document reprend la structure de mon dossier de candidature au CNRS avec une réflexion sur le contexte et les enjeux de mes recherches suivi d'un aperçu rapide de mes activités de recherche. Ensuite, j'ai voulu montrer l'enchaînement logique des travaux qui nous ont conduit à résoudre l'énigme du retrait paradoxal du bois de tension. Cette question qui depuis le début, il y a 10 ans, est présente dans mes recherches trouve aujourd'hui des éléments de réponse. Enfin, mon curriculum vitae donne une idée de ma production scientifique, de mes activités de formation et d'encadrement, de mon implication dans la vie de la recherche localement, au niveau national et international.

ENQUETE SUR LE COMPORTEMENT PARADOXAL

DU BOIS DE TENSION

CONTEXTE ET ENJEUX

Biomécanique de l'arbre

La biomécanique des plantes utilise conjointement des concepts et outils de la mécanique des matériaux et des structures. Elle vise à comprendre et analyser comment les végétaux trouvent des solutions aux différents problèmes mécaniques auxquels ils sont confrontés : leur élaboration (croissance de la structure), leur adaptation aux conditions de milieu et aléas de l'histoire, leur l'ancrage dans le substrat nutritif et à la gestion des interactions avec les autres êtres vivants. Dans le cas des arbres, les traits fonctionnels mécaniques sont particulièrement importants dans la conquête de la lumière sur des temps très long, ce qui justifie un investissement aussi important en matériau de structure. Il s'agit d'une préoccupation majeure et très ancienne pour la biologie. Le constat reste néanmoins que l'interdisciplinarité nécessaire entre les sciences de l'ingénieur concernées (mécanique des fluides et des solides, physique des transferts ...) et les sciences biologiques n'est pas toujours suffisante, ce qui engendre des lenteurs voire des raisonnements erronés de part et d'autre. A titre d'exemple, à propos des interactions avec la mécanique des solides, les interprétations des biologistes méconnaissent trop souvent les phénomènes d'autocontraintes dans les tissus végétaux, les relations parfois complexes entre la structure cellulaire et l'organisation hétérogène des tissus d'une part et leurs propriétés mécaniques d'autre part. Réciproquement, les mécaniciens qui abordent le vivant ont difficilement une approche globale de l'ontogenèse des plantes (physiologie, architecture ...), et ignorent les interactions et compromis complexes entre les différentes fonctions (soutien, conduction, photosynthèse, reproduction) qui conduisent à l'évolution et à l'acclimatation des structures.

Matériau bois

Face au regain d'intérêt pour le matériau bois (enjeux environnementaux et stockage du carbone, enjeux économiques), on identifie clairement le besoin d'améliorer nos connaissances théoriques sur le comportement mécanique et la variabilité du matériau. Pour compléter des approches statistiques agronomiques, il semble aujourd'hui nécessaire de comprendre les mécanismes de cette variabilité des propriétés macroscopiques à partir de la microstructure à différentes échelles, de la genèse et de l'histoire du bois dans l'arbre.

Dans cette approche, sur la plupart des matériaux, les mécaniciens ont souvent joué un rôle moteur se tournant tantôt vers le physicien, tantôt vers le chimiste, pour l'analyse de la microstructure du matériau. Dans le cas du bois, que ce soit pour l'étude des processus de coupe, des fentes à l'abattage ou des déformations au séchage d'une planche, les mécaniciens se sont spontanément tournés vers le spécialiste de la structure du bois : l'anatomiste, qui lui, relève plutôt de la biologie végétale.

Aujourd'hui, la description morphologique ne suffit plus et il est important de pouvoir accéder à des informations locales, *in situ*, sur le comportement physico-mécanique des composants de la matière ligneuse, accessibles à l'observation grâce à des outils de plus en plus performants. L'utilisation des techniques de la physique, telles que la diffraction des rayons X ou la micro-densitométrie, a beaucoup aidée à la compréhension du matériau bois dans les dernières décennies. Aujourd'hui, de nouvelles techniques émergent dans le monde des physiciens. La coopération avec des équipes maîtrisant et développant ces techniques peut permettre d'accéder à de nouvelles informations sur le bois aux différentes échelles et notamment à l'échelle de la paroi.

Un enjeu pour les années à venir est de mettre les compétences de la physique au service de la compréhension du matériau bois, à l'interface entre le mécanicien et le biologiste.

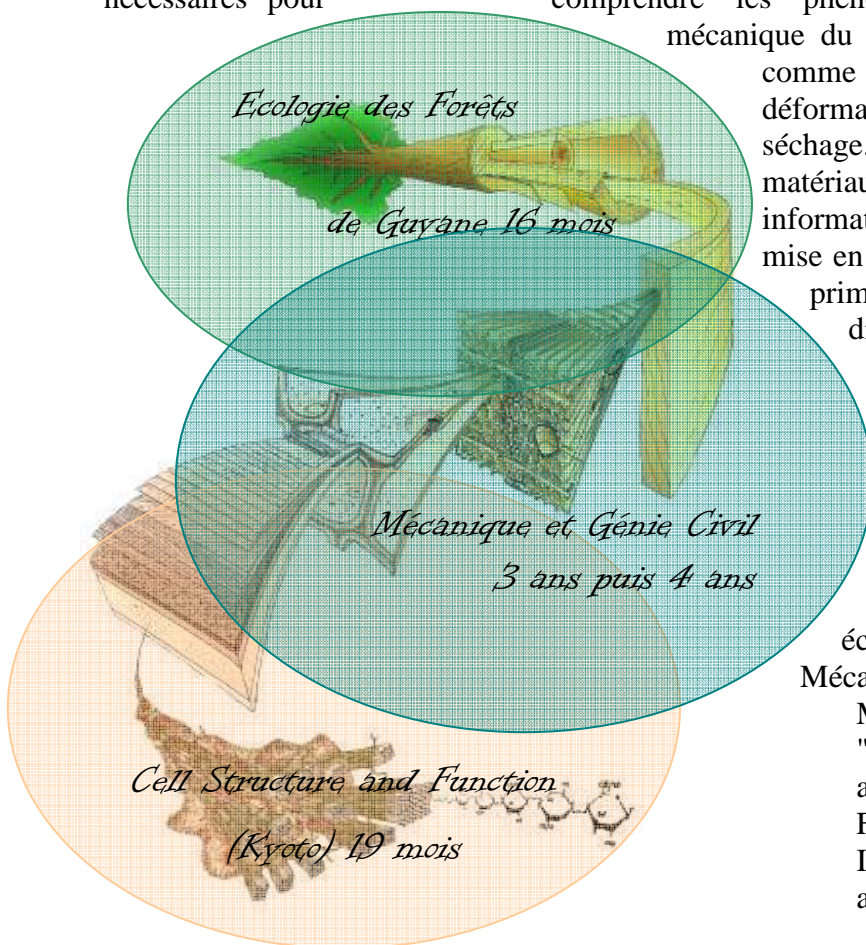
Pour comprendre les propriétés du bois, le matériau doit être examiné dans son ensemble en **considérant toutes les échelles** : de la structure vivante, arbre sur pied, jusqu'à sa composition aux échelles les plus fines... cellules, parois, couches voire même constituants chimiques. Il est donc important de privilégier une approche multi-échelle et multi-disciplinaire, mettant en relation les informations de toutes natures (physiologique, mécanique, physique et chimie) recueillies à chaque niveau d'observation.

A l'interface entre le bois dans l'arbre et le bois matériau

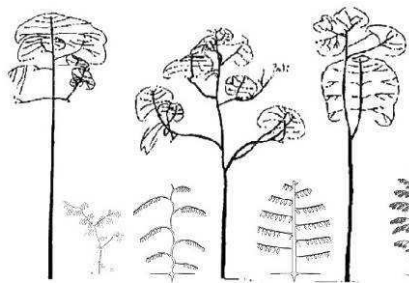
Ces deux disciplines sont totalement interdépendantes. Les études biomécaniques sont nécessaires pour

comprendre les phénomènes résultant de l'histoire mécanique du bois dans l'arbre avant abattage, comme les fentes d'abattage, les déformations instantanées au sciage ou au séchage. Réciproquement, l'étude du matériau nous donne de nombreuses informations sur sa structure et donc sa mise en place dans l'arbre. Il semble donc primordial de décloisonner ces deux disciplines pour qu'au lieu d'avancer en parallèle, elles profitent en synergie des avancées de chacune.

Mon parcours dans la recherche s'est situé à l'interface entre ces deux disciplines avec des allers et retours entre les différentes échelles. D'abord au Laboratoire de Mécanique et Génie Civil de Montpellier, puis à l'UMR "Ecologie des forêts de Guyane" et au laboratoire "Cell Structure and Function" du "Wood Research Institut" de Kyoto avant de revenir au LMGC.

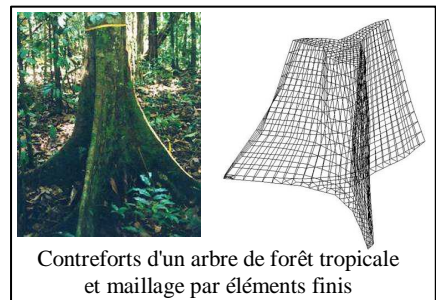


PRESENTATION GENERALE SYNTHETIQUE DES ACTIVITES DE RECHERCHE ¹

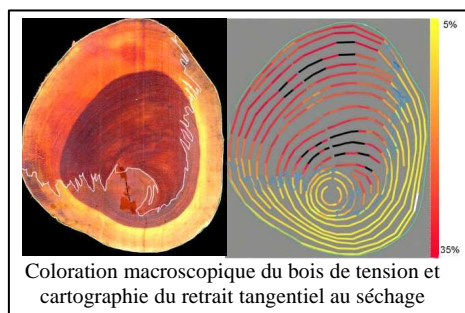


L'arbre est programmé pour s'élancer vers la lumière. Cet élancement est supporté par le tronc qui soutien la forte charge que représente son feuillage. Sa stratégie pour faire face aux aléas que lui réserve la nature pourrait être de produire un tronc massif, surdimensionné par rapport à la charge. Pourtant, une étude expérimentale ² sur une communauté de 100 juvéniles en forêt tropicale a montré que l'élancement des tiges peut être extrême. Ainsi, la plante alloue peu de matière à la croissance en diamètre en

prenant le risque de s'effondrer sous son propre poids [Ci6]. Ce risque est compensé, chez la quasi-totalité des individus, par un processus actif de réorientation grâce à la mise en place de pré-contraintes périphériques asymétriques qui permettent un réajustement constant de la verticalité et une bonne tenue mécanique [M8, Ci6]. L'arbre prend des risques parce qu'il peut réagir en continu. Cette stratégie est moins coûteuse en biomasse que de réaliser des structures sécurisées moins élancées³. Si la plupart des angiospermes génère l'asymétrie par la production de bois en très forte tension sur la face supérieure, nous avons montré que les angiospermes peuvent aussi produire du bois en compression sur la face inférieure pour renforcer l'asymétrie [A12]. Bien que marginaux, d'autres mécanismes sont aussi utilisés par l'arbre pour maintenir sa stabilité telle que la présence chez certains arbres tropicaux d'un large empattement appelé contrefort [Cia2]. Une étude sur l'importance de la fonction mécanique des contreforts ⁴ révèle deux mécanismes cumulatifs [M4, M5]. Un mécanisme passif : l'optimisation de la répartition de la matière donne à l'arbre une assise plus importante et une plus forte résistance en flexion [A6]. Un mécanisme actif : l'asymétrie de forme dans le tronc que génère la mise en place du contrefort permet une meilleure efficacité du différentiel de contrainte pour le redressement de l'axe principal (tronc) [Ci5].



Contreforts d'un arbre de forêt tropicale et maillage par éléments finis



Coloration macroscopique du bois de tension et cartographie du retrait tangentiel au séchage

Le bois à forte précontrainte de tension, appelé "bois de tension", a une structure et une composition chimique singulièrement différente du bois dit "normal". Ces modifications de structure s'accompagnent de changements des propriétés macroscopiques telles le retrait au séchage [M3, M6, A3, A5, A16, A18], le comportement élastique [A3, A21] ou de rupture [MT2, A16]. Le comportement à long terme (viscoélastique)

¹ Les [...] renvoient à la liste des publications du curriculum vitae. J'ai privilégié les références à des articles publiés dans des revues à comité de lecture [A...], les autres lettres faisant référence à d'autres types de communications quand il n'y a pas eu (ou pas encore) de publication.

² Recherches réalisées dans l'équipe "Biomécanique" de l'UMR "Ecologie des Forêts de Guyane" 2001-2002 en collaboration avec M. F. Prevost IRD Cayenne (AMAP, UMR 5120) sous la direction de M. Fournier

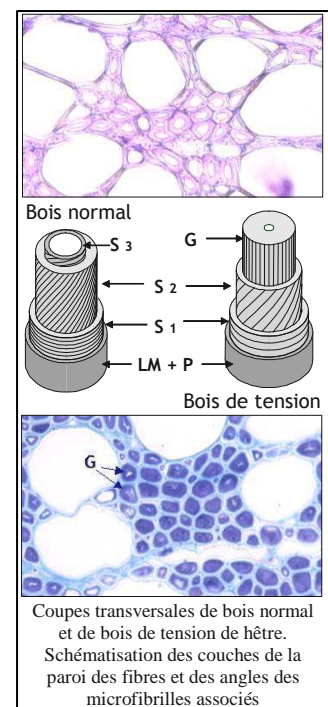
³ Ces travaux ont été un point de départ d'études avec M. Fournier qui ont donné lieu en 2005 au montage du projet ANR "Wooddiversity: Diversité des structures de bois et analyse biophysique des stratégies écologiques des ligneux en forêt tropicale humide" impliquant 4 laboratoires français (LMGC, ECOFOG, AMAP, PIAF)

⁴ Collaboration : F. Dubois, IR Calcul Scientifique au LMG (UMR 5508)

du bois de tension est peu connu et son étude est complexe⁵ car elle nécessite la prise en compte de la libération des contraintes bloquées pendant les essais [A20]. La validation du principe d'équivalence temps température [A22] permet ensuite d'extrapoler les résultats d'essais réalisés sur quelques jours pour les études biomécaniques s'intéressant à des durées de quelques dizaines d'années.

L'étude du bois de tension est d'un intérêt majeur, tant d'un point de vue fondamental par le biomécanicien pour la compréhension des processus actifs du soutien mécanique de l'arbre, que d'un point de vue appliqué pour l'utilisation du matériau bois. Enfin, pour l'efficacité de sa capacité de réaction et ses propriétés parfois paradoxales, le bois de tension intéresse aussi les biomiméticiens qui commencent à voir en lui l'inspiration pour de nouveaux matériaux.

Le comportement macroscopique du bois s'explique par sa structure. Le bois s'élabore en périphérie du tronc par la division vers l'intérieur de cellules mères (cambium). Après la division cellulaire, les cellules filles se différencient en divers types de cellules répondant aux fonctions de base de l'arbre : conduction de la sève, stockage et transformation des réserves et soutien mécanique. Cette dernière fonction est assurée par la fibre, cellule de base dans les fonctions de soutien mécanique. La fibre de bois normal se compose d'un empilement concentrique de couche dans lesquelles le réseau de microfibrilles de cellulose incrusté de lignines est orienté selon des angles distincts, alternant angle fort et faible par rapport à l'axe de la cellule pour en augmenter sa rigidité et prévenir son flambement. Pour la mise en place des fortes contraintes, la fibre de bois de tension va être profondément modifiée avec l'apparition, chez la plupart des espèces modèles tempérées (peuplier, hêtre, chêne, châtaigner), d'une nouvelle couche remplaçant partiellement les couches existantes. Cette couche appelée couche gélatineuse (couche G) est très cellulosique et les microfibrilles de cellulose y sont très parallèles entre elles, formant un angle faible avec la verticale. Des études² sur une large diversité d'espèces en forêt tropicale montrent qu'il existe en fait de nombreux types de morphologie de fibres de bois de tension [A9], avec un gradient de lignification depuis la couche G typique jusqu'à l'absence totale de couche G [Ci18] et la présence parfois de structures particulières tel la structure lamellaire observée chez les Flacourtiaceae [A13]. Des travaux sont en cours pour arriver à une définition plus objective de la notion de couche G s'appuyant sur la quantification de la composante gélatineuse [A25]⁶. Avec ou sans couche G et quel que soit le degré de lignification la seule constante semble être l'angle des microfibrilles⁸ qui y est systématiquement très faible [A10]. La taille des cristallites de cellulose y est plus élevée chez le peuplier [A19] ainsi que chez Eperua, Simarouba et Laetia qui présentent chacun des structures de couche G très différentes⁷.



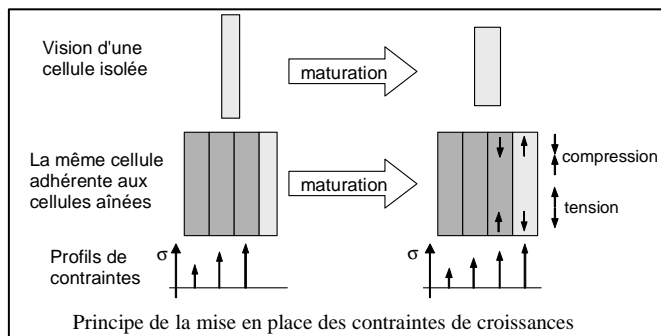
Une part importante de mes recherches vise à décrire et expliquer les propriétés mécaniques de la fibre à l'échelle de la paroi. Deux aspects retiennent mon attention : la caractérisation de l'état mécanique de la paroi (contraintes résiduelles) et son comportement hygro-mécanique.

⁵ Travail de thèse de Jana DLOUHA au LMGC

⁶ Travail de thèse de Shanshan CHANG au LMGC.

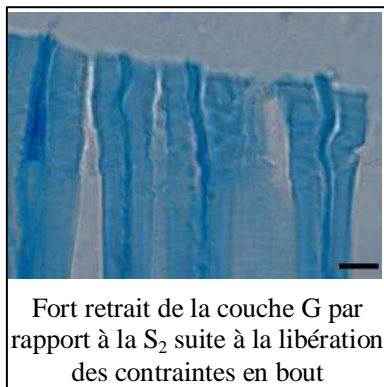
⁷ Travail de thèse de Julien RUELLE à EcoFoG et à l'université de Nagoya [MT1]

Caractérisation de l'état mécanique de la fibre et genèse des contraintes de croissance



Au cours de la différenciation, la fine membrane de la nouvelle cellule va s'épaissir et se renforcer par des dépôts ligno-cellulosiques pour former la cellule adulte. Lors de la maturation, dernière phase du processus de différenciation, quand la fibre a déjà acquis ses dimensions et sa forme finales, elle aurait tendance à se contracter longitudinalement et à se

dilater diamétralement. Ces déformations sont bloquées par l'adhérence de la jeune cellule au cylindre massif de bois rigide déjà existant. Ainsi, la nouvelle cellule se retrouve en précontrainte de tension suivant la direction longitudinale et ce d'autant plus fortement dans le bois de tension. La libération des contraintes par deux traits de scie de part et d'autre d'une jauge de déformation permet d'obtenir aisément une estimation de cette contrainte résiduelle macroscopique [M9, A3, A5, A10, A12]. Cependant, l'état de contrainte de la fibre elle-même et plus finement des couches dans la paroi est encore inexploré alors que ce serait une précieuse information pour décrire sa mise en place et ses conséquences sur le matériau. Deux voies ont été explorées pour caractériser l'état mécanique de la fibre⁸ : i. l'observation et la mesure des déformations des couches de la paroi cellulaire consécutives à la création d'une surface libre lors de la coupe, ii. la mesure des déformations du réseau cristallin de la cellulose et de son orientation lors de la mise en place des contraintes ou de leur libération.



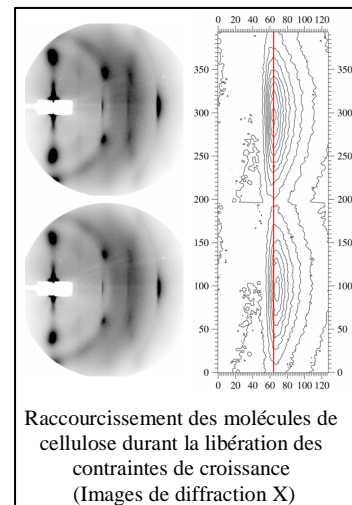
Pour comparer l'état de tension des couches de la paroi, les déformations en bout consécutives à la coupe de fibres ont été observées. L'étude a été menée sur du bois de tension en vue de mettre en évidence la forte précontrainte longitudinale dans la couche G. Les déformations transverses ont été observées en microscopie optique sur coupes sériées après leur blocage selon les protocoles classiques d'inclusion en résine [A7]. Les déformations longitudinales, visibles sur des coupes anatomiques dans le plan longitudinal ont été quantifiées en microscopie à force atomique⁹ (AFM). On observe une forte rétraction selon la direction de la fibre de la couche G par rapport aux autres couches allant jusqu'à produire son décollement des autres couches (déformation longitudinale de l'ordre de quelques pourcents) [A8]. Conjointement, la couche G gonfle de plus de 50 % dans la direction transverse. Une analyse mécanique du phénomène a permis de mettre en évidence la forte contrainte de tension initiale dans la couche ainsi que de formuler des hypothèses sur la structure de cette couche [Cia6], [Ci2]. Le gonflement observé nous oblige aussi à reconsidérer les observations anatomiques du bois de tension généralement réalisées sur des coupes de 10 à 20 μm, surestimant ainsi systématiquement l'épaisseur de la couche G et dénaturant son organisation et son adhésion aux autres couches.

⁸ Recherches réalisées au "Laboratory of Cell Structure and Function", Wood Research Institute (Université de Kyoto, Japon) 2002 - 2003. Collaboration : J. Gril et B. Thibaut, LMGC (UMR 5508)

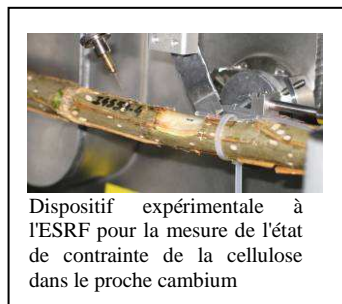
⁹ Réalisé au Service Commun de Microscopie en Champ Proche, Université Montpellier 2.

Une nouvelle étude de quantification de la quantité de couche G prenant en compte l'artefact confirme le rôle moteur de celle-ci dans le niveau de contrainte du bois de tension chez le peuplier [A17].

Pour connaître les éléments intervenant à l'échelle macromoléculaire dans la mise en contrainte de la paroi, il est intéressant de suivre les déformations du réseau cellulosique cristallin au cours de la libération des contraintes dans le bois. Les mesures ont été réalisées par diffraction X au synchrotron de Hyogo (SPring-8, Japon) pour bénéficier d'un rayonnement de très forte puissance autorisant l'expérimentation en dynamique. Le bois de tension, à nouveau, a été choisi comme matériau de validation car en plus des fortes valeurs de contraintes, l'excellente organisation des microfibrilles de cellulose dans la paroi, leur forte concentration et leur faible inclinaison par rapport à l'axe de la cellule minimisent la dispersion des rayons X. Durant la libération des contraintes de maturation on observe une déformation du réseau moléculaire de l'ordre de grandeur de la déformation macroscopique de l'échantillon. Ceci met en évidence l'état de tension des molécules de cellulose dans le bois sous contrainte et confirme le rôle moteur de la cellulose dans le processus de maintien de la contrainte [A11].



Ces premiers résultats sur l'observation de l'état de tension de la cellulose nous ont conduits à présenter un nouveau projet, cette fois ci au Synchrotron de Grenoble (ESRF) pour bénéficier d'un rayon micrométrique afin de suivre l'état de tension de la cellulose juste après sa synthèse à proximité du cambium¹⁰. Les expériences menées en juin 2007 montrent que l'on peut observer une phase d'élongation du cristal de cellulose dans la phase de maturation alors que cette phase n'est pas observée dans le bois normal. Ceci supporte fortement l'idée que la contrainte de tension est issue d'une tension induite dans les microfibrilles de cellulose pendant la maturation [R3].



Comportement hygro-mécanique

Au delà de l'état de contrainte de la fibre, nous nous intéressons aussi à la caractérisation de son comportement mécanique. De l'état saturé d'eau, dans l'arbre, à l'état sec, dans le bois matériau, le comportement de la fibre évolue. Les conséquences macroscopiques des variations d'humidité du bois sont importantes pour l'utilisation du bois (changements dimensionnels et de rigidité).

Nous nous sommes donc intéressé aux propriétés de la paroi des fibres dans les différentes conditions d'humidité ainsi qu'aux déterminants microscopiques des variations dimensionnelles du bois lors de variations d'humidité ou de son chargement à long terme (fluage).

La modélisation des propriétés du bois d'après la microstructure manque souvent de résultats expérimentaux sur les propriétés aux petites échelles. Alors que d'autres équipes concentrent leurs recherches sur la mesure des propriétés globales de la fibre (essai de traction sur fibre isolée), nous avons voulu caractériser le comportement à l'échelle de la paroi¹¹. Les outils

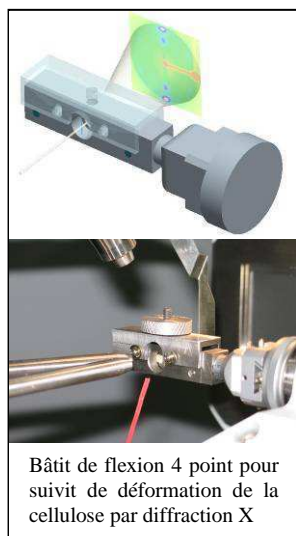
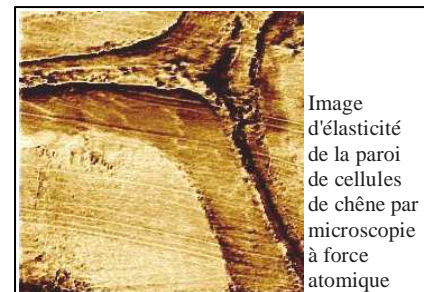
¹⁰ Recherches réalisées au LMGC en collaboration avec C. Riekel (ESRF) et G. Pilate (INRA Orléans)

¹¹ Recherches réalisées au LMGC 1998-2001

n'étant pas disponibles pour cette caractérisation, nous nous sommes pour cela tournés vers les compétences des physiciens¹² pour développer deux techniques complémentaires [B1], [Cia4].

Pour les mesures en milieu liquide, nous avons opté pour l'utilisation de la microscopie acoustique. Une onde acoustique haute fréquence (0,6 à 1 GHz), focalisée par un dioptre, se propage dans le liquide couplant pour interagir avec l'échantillon. La mesure des vitesses de propagation des ondes acoustiques dans les couches et de leur atténuation doit permettre une caractérisation quantitative à l'échelle micrométrique des propriétés du bois à l'état saturé. Suite à une première étude montrant les limites de la microscopie acoustique en réflexion pour l'étude des matériaux d'origine biologique [A1], un nouveau microscope acoustique en transmission spécifiquement dédié au bois a été conçu et réalisé [M1, Cia1]. Les résultats obtenus sont pour l'instant qualitatifs et on y voit bien les différences de rigidité et d'atténuation entre les couches. Des validations resteraient à faire pour les mesures quantitatives, mais la collaboration avec le laboratoire partenaire n'a pas été maintenue est le prototype de microscope est aujourd'hui tristement à l'abandon.

Pour les mesures en milieu gazeux (différents degrés d'humidité), l'utilisation de la microscopie à force atomique et les mises au point spécifiques pour son utilisation en mode contact vibrant ont permis une cartographie des rigidités à l'échelle nanométrique [A4]. L'estimation des modules élastiques des différentes couches reste cependant très tributaire des hypothèses de structure et de comportement puisque la couche est pour l'instant



assimilée localement à un corps isotrope parfaitement élastique. Des validations sont nécessaires et il s'avère indispensable de modéliser le contact pointe - échantillon pour en comprendre le comportement local dans le cas d'un matériau composite fibreux orienté tel qu'est le bois à cette échelle (je ne suis plus moteur de cet axe de recherche qui est aujourd'hui poursuivi par O. Arnould au LMGc [M10]).

Depuis peu, un nouvel axe de recherche apparaît sur les déterminants microscopiques du fluage mécanosorptif¹³. Nous souhaitons voir si ce phénomène se produit à l'échelle cellulaire (glissement des fibres) ou intrapariétale (glissement des microfibrilles). Pour cela, nous suivons les déformations de la cellulose par diffraction X le long d'une éprouvette soumise en flexion. Nous étudions dans un premier temps le comportement élastique instantané, mais déjà les premiers tests sur échantillons flués sont réalisés (analyse en cours).

Note: les paragraphes qui suivent sont un résumé rapide de ce qui est détaillé dans le chapitre suivant. Afin de garder tout l'attrait de ce qui suit, je vous invite à ne lire le paragraphe suivant que si vous ne souhaitez pas lire le prochain chapitre (ou à le lire après).

¹² Collaborations avec les équipes "Acoustique" et "Champ Proche" du Laboratoire d'Analyse des Interfaces et de Nanophysique (UMR 5011)

¹³ Travail de thèse de Cédric MONTERO

Dans l'arbre, les cellules sont saturées d'eau. Celle-ci est présente sous forme d'eau libre dans les cavités (lumens des fibres, vaisseaux) et sous forme d'eau liée dans la paroi. Pour son utilisation, le bois est stabilisé à l'humidité ambiante. Après stabilisation, il n'y a plus d'eau libre dans le bois, et seule une faible part de l'eau liée est encore présente. Le départ de l'eau liée s'accompagne de déformations importantes (jusqu'à 10 % dans la direction tangentielle) qui sont un souci majeur pour l'utilisateur. Le retrait (notamment dans la direction longitudinale) s'explique en grande partie par l'orientation des microfibrilles dans la paroi. Ainsi, plus l'angle des microfibrilles est incliné par rapport à l'axe de la cellule, plus les retraits transverses seront faibles et le retrait longitudinal fort [A3]. Pourtant cette relation connue et confirmée pour les bois de résineux et le bois normal des feuillus, se trouve paradoxalement contredite dans le bois de tension où l'on trouve un retrait longitudinal fort [A3] malgré un angle très faible de microfibrilles, notamment dans la couche G. Des expérimentations ont été réalisées pour observer le séchage du bois de tension à l'échelle de la paroi.

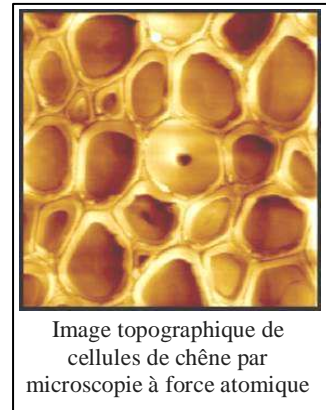
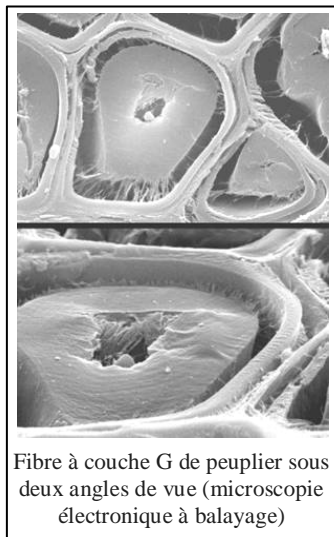


Image topographique de cellules de chêne par microscopie à force atomique



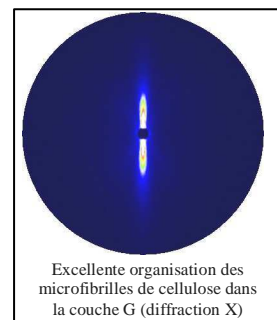
Fibre à couche G de peuplier sous deux angles de vue (microscopie électronique à balayage)

La mise au point de nouveaux protocoles d'observation en microscopie électronique à balayage avec notamment l'utilisation de la stéréoscopie [M2] et l'utilisation de techniques nouvelles telles que la microscopie à force atomique ou la microscopie électronique environnementale, ont permis d'observer et mesurer les déformations de séchage du bois à l'échelle pariétale¹⁴.

Il apparaît que la couche G, en plus de son fort retrait transverse, a un retrait axial important malgré ce que l'on connaît de sa structure (cellulose très cristalline orientée suivant l'axe de la cellule). Ainsi, le retrait axial de la couche G serait le moteur du fort retrait macroscopique des bois de tension [A2].

Reste néanmoins deux questions : comment la couche G peut elle avoir un retrait fort ? et qu'en est il des bois de tension sans couche G ?

Nous nous sommes donc intéressé à décrire cette couche finalement peut connue. L'excellente organisation des microfibrilles dans la couche G permet d'envisager la caractérisation de leur forme, de leur taille par observation directe en microscopie électronique en transmission (TEM)¹⁵ [A19]. En parallèle, des observations indirectes par mesure de diffraction des rayons X ont été réalisées. Il apparaît que la couche G, très cellulosique et très ordonnée, seraient composé de cristallites plus large. Cependant, la trop grande différence de constitution entre bois normal et bois de tension rend difficile la comparaison des résultats obtenus entre bois avec et sans couche G. Ainsi, face aux difficultés d'interprétation des mesures de cristallinité réalisées par diffraction X, une nouvelle voie méthodologique a été développée par spectroscopie infrarouge (FTIR) après traitement au



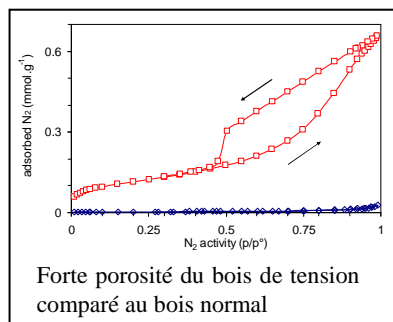
Excellente organisation des microfibrilles de cellulose dans la couche G (diffraction X)

¹⁴ Recherches réalisées au LMGC en 1998-2001 en collaboration avec les Service Commun de microscopie électronique et de Microscopie en Champ Proche de l'Université Montpellier 2. Collaboration avec H. Garreau de la Faculté de Pharmacie de Montpellier (CRBA, UMR CNRS 5473) pour les observations en microscopie électronique environnementale.

¹⁵ Recherches réalisées au "Laboratory of Cell Structure and Function", Wood Research Institute (Université de Kyoto, Japon) 2002 - 2003.

Deutérium¹⁶. Déjà cette technique encore montre des cristallites de cellulose plus large dans le bois de tension par rapport au bois normal [A19]. Cette technique nous a aussi permis de montrer que la taille des microfibrilles augmente suite au séchage dans la couche G [Cna2]. L'agglomération des microfibrilles entre elles après le départ de l'eau pourrait expliquer ce résultat qui pourrait être à l'origine de la forte hausse de rigidité observée au séchage dans le bois de tension.

D'autres mesures en diffraction X réalisées sur des échantillons de bois de tension au cours de leur séchage montrent un très faible retrait longitudinal des microfibrilles comparé au retrait macroscopique [A11]. La cellulose ne peut donc pas être l'unique moteur du retrait de la couche G. Des mesures de porosité¹⁷ ont finalement révélées récemment la structure type "gel" de la couche G et son collapse intégrale au séchage [A15]. Ainsi, lors du séchage, le gel



composant la couche G collapse en entraînant le flambement de microfibrilles de cellulose. L'hypothèse du collapse de la couche G est aussi supportée par les observations d'un très fort retrait transverse dans la couche G [A14].

Pour les bois de tension sans couche G, le retrait est moins fort que dans les bois à couche G mais tout de même deux fois supérieur au bois normal. Des mesures de variations dimensionnelles lors de la substitution de l'eau par de l'alcool montrent un retrait longitudinal du bois de tension similaire

avec ou sans couche G (châtaignier et simarouba). Celui-ci résulterait de la déformation de la lamelle mitoyenne rendu possible par l'action conjointe de la forte contrainte de tension dans la couche S₂ (ou G) et du ramollissement de la lamelle mitoyenne provoqué par les échanges eau-éthanol (selon des processus similaire à la mécano-sorption) [A18]. Un mécanisme analogue pourrait être évoqué pour expliquer le retrait de séchage puisque durant le séchage aussi, la paroi pourrait être "ramollie" par le départ de molécules d'eau.

Références des publications, communications et mémoires co-encadrés :

- [MT2] FANG C.H. (2007) Contribution de la couche gélatineuse au comportement du bois de tension du peuplier: contraintes de croissance et propriétés du matériau, Thèse de l'Université Montpellier 2 et de l'Université d'Agriculture de Anhui, sout. 24.07.2007 à Hefei, Chine.
- [MT1] RUELLE, J. (2006) Analyse de la diversité du bois de tension de 3 espèces d'angiospermes de forêt tropicale humide de Guyane Française. Thèse de l'Université Antilles-Guyane et de l'Université de Nagoya, Soutenue le nov. 2006 à Cayenne.
- [M11] P. CABROLIER (2007) Comportement mécanique des bois contrefilés. M2 Mécanique & Ingénierie, Université Montpellier 2. (Co-encadrement J. BEAUCHENE, B. THIBAUT, EcoFoG, Kourou)
- [M10] K. BYTEBIER (2006) Mesure des propriétés mécaniques dans la paroi par microscopie à force atomique. M2 Mécanique & Ingénieries, Université Montpellier 2.
- [M9] P. CABROLIER (2006) Evaluation du profil des contraintes résiduelles dans l'arbre : Méthode de mesure expérimentale à l'aide de jauges. M1 Mécanique & Ingénieries, Université Montpellier 2.
- [M8] Biomécanique d'un peuplement de jeunes arbres en forêt primaire : stratégies de soutien dans la phase post-juvénile. 5 et 8 élèves ingénieurs (2003 et 2006) de l'ENGREF et du CNEARC ; Exercices terrain dans le cadre de la formation "Forêt Tropicale Humide" (ENGREF-Kourou)
- [M7] RUELLE J. (2002) Diversité anatomique du bois de tension chez 24 espèces de forêt tropicale humide (Guyane Française). Maîtrise de Biologie Cellulaire et Physiologie, (Option Physiologie Végétale Appliquée) Université Montpellier 2

¹⁶ Travaux initié pendant mon post-doc à Kyoto et poursuit dans le travail de thèse de HORIKAWA

¹⁷ Recherches réalisées au LMGC en collaboration avec F. Quignard et F. di Renzo (Institut Gerhart, Montpellier)

- [M6] JAOUEN G. (2002) Méthodes de caractérisation du bois de tension de *Symphonia globulifera* L. en vue d'étudier son rôle biomécanique. Maîtrise de Biologie Cellulaire et Physiologie, (Option Physiologie Végétale) Université Blaise Pascal Clermont II
- [M5] PASCO G. (2002) Description mécanique et maillage 3D d'un contreforts d'arbre tropical 4ème année de l'Ecole Nationale d'Ingénieur de Metz (ENIM)
- [M4] Mesures de déformations sous sollicitation mécanique et de déformations résiduelles de maturation sur un contrefort d'arbre de forêt tropicale (2002) 4 Elèves ingénieurs de l'ENGREF ; Exercice terrain dans le cadre de la formation "Forêt Tropicale Humide" (ENGREF-Kourou)
- [M3] RUELLE J. (2001) Recherche de paramètres anatomiques expliquant quelques propriétés physiques et mécaniques du bois de châtaigner Licence de Biologie, (Option Physiologie Végétale Appliquée) UM2
- [M2] ALIOTTI F. (2001) Mesure de différentiels de retraits dans la paroi cellulaire par microscopie électronique Maîtrise de Physiologie Végétale Appliquée (Option Instrumentation) UM2
- [M1] FRAISOU C. (2001) Conception d'un microscope acoustique en transmission, 2ème et 3ème année IUP Génie Mécanique et Productique UM2
- [A25] Chang S.S., Clair B., Ruelle J., Beauchêne J., Di Renzo F., Quignard F., Zhao G.J., Yamamoto H., Gril J. (soumis 2008) *Mesoporosity as a new parameter in understanding of tension stress generation in trees*, Journal of Experimental Botany
- [A22] Dlouha J., B. Clair, O.Arnould, P. Horacek, J. Gril. (soumis 2008). Prediction of long-term behaviour of green wood based on time-temperature equivalency, *Holzforschung*.
- [A21] Yamamoto H., Ruelle J., Arakawa Y., Yoshida M., Clair B., Gril J. (soumis 2008) Origin of the characteristic hygro-mechanical properties of the gelatinous layer in tension wood from Kunugi oak (*Quercus acutissima*), *Wood science and technology*.
- [A20] Dlouha J., J. Gril, B. Clair, T. Alméras. (accepté 2008). Evidence and modelling of physical aging in green wood *Rheological acta*.
- [A19] Horikawa Y., Clair B., Sugiyama J. (accepté 2008) Varietal difference in cellulose microfibril dimensions observed by infrared spectroscopy, *Cellulose*.
- [A18] Chang S.S., Clair B., Gril J., Yamamoto H., Quignard F. (accepté 2008) Deformation induced by ethanol substitution in normal and tension wood of chestnut (*Castanea sativa* Mill.) and simarouba (*Simarouba amara* Aubl.), *Wood science and technology*.
- [A17] Fang C.H., Clair B., Gril J., Liu S.Q. (2008) Growth stresses are highly controlled by the amount of G-layer in poplar tension wood, *IAWA Journal*, 29, 3, 237-246..
- [A16] Fang C.H., Guibal D., Clair B., Gril J., Liu Y.M., Liu S.Q. (2008) Influence of growth stress level on wood properties in Poplar I-69 (*Populus deltoides* Bartr.cv."Lux" ex I-69/55) , *Annals of Forest Science*, vol. 65, 307.
- [A15] Clair B., Gril J., Di Renzo F., Yamamoto H., Quignard F. (2008) Characterization of a gel in the cell wall to elucidate the paradoxical shrinkage of tension wood, *Biomacromolecules*, vol. 9, 2, 494-498.
- [A14] Fang C., Clair B., Alméras T., Gril J. (2007) Transverse shrinkage in G-fibers as a function of cell wall layering and growth strain, *Wood science and technology*, vol. 41, 8, 659-671.
- [A13] Ruelle J., Yoshida M., Clair B., Thibaut B. (2007) Peculiar tension wood structure in *Laetia procera* (Poepp.) Eichl. (Flacourtiaceae), *Trees structure and function*, vol. 21, 3, 45-355.
- [A12] Clair B., Alméras T., Sugiyama J. (2006) Compression stress in opposite wood of angiosperms: observations in chestnut, mani and poplar, *Annals of Forest Science*, vol. 63, 507-510.
- [A11] Clair B., Alméras T., Yamamoto H., Okuyama T., Sugiyama J. (2006) Mechanical behavior of cellulose microfibrils in tension wood in relation with maturation stress generation, *Biophysical Journal*, vol. 91, 3, 1128-1135.
- [A10] Clair B., Ruelle J., Beauchêne J., Prevost M.F., Fournier M. (2006) Tension wood and opposite wood in 21 tropical rain forest species. 1. Occurrence and efficiency of G-layer, *IAWA Journal*, vol. 27, 3, 329-338.
- [A9] Ruelle J., Clair B., Beauchêne J., Prevost M.F., Fournier M. (2006) Tension wood and opposite wood in 21 tropical rain forest species. 2. Comparison of some anatomical and ultrastructural criteria, *IAWA Journal*, vol. 27, 4, 341-376.
- [A8] Clair B., Thibaut B., Sugiyama J. (2005) On the detachment of the gelatinous layer in tension wood fiber, *Journal of Wood Science*, vol. 51, 3, 218-221.

- [A7] Clair B., Gril J., Baba K., Thibaut B., Sugiyama J. (2005) Precautions for the structural analysis of the gelatinous layer in tension wood, *IAWA Journal*, vol. 26, 2, 189-195.
- [A6] Clair B., Fournier M., Prévost M.F., Beauchêne J., Bardet S. (2003) Biomechanics of buttressed trees: bending strains and stresses, *American Journal of Botany*, vol. 90, 9, 1349-1356.
- [A5] Clair B., Jaouen G., Beauchêne J., Fournier M. (2003) Mapping radial, tangential and longitudinal shrinkages and its relation to tension wood in discs of the tropical tree *Symphonia globulifera*, *Holzforschung*, vol. 57, 6, 665-671.
- [A4] Clair B., Arinero R., Leveque G., Ramonda M., Thibaut B. (2003) Mechanical properties of wood cell wall layers : Experiments by atomic force microscopy, *IAWA Journal*, vol. 24, 3, 223-230.
- [A3] Clair B., Ruelle J., Thibaut B. (2003) Relationship between growth stresses, mechano-physical properties and proportion of fibres with gelatinous layer in chestnut (*Castanea Sativa* Mill.), *Holzforschung*, vol. 57, 2, 189-195.
- [A2] Clair B., Thibaut B. (2001) Shrinkage of the gelatinous layer of poplar and beech tension wood, *IAWA Journal*, vol. 22, 2, 121-131.
- [A1] Clair B., Despaux G., Chanson B., Thibaut B. (2000) Utilisation de la microscopie acoustique pour l'étude des propriétés locales du bois : étude préliminaire de paramètres expérimentaux, *Annals of Forest Science*, vol. 57, 335-343.
- [B1] Clair B., Thibaut B. (2004) Evaluation of physical and mechanical properties at cell wall level with new microscopy tools, in: *Wood Fibre Cell Walls: Methods to Study their Formation, Structure and Properties* (COST Action E20), U. Schmitt, P. Ander, J.R. Barnett, A.M.C. Emons, G. Jeronimidis, P. Saranpää, S. Tschegg (eds), Series, Swedish University of Agricultural Science, p. 245-264.
- [Cia6] Clair B., Gril J., Baba K., Sugiyama J. (2004) Revealing growth stresses at the cell-wall level in poplar tension wood, 3rd International Conference of the European Society for Wood Mechanics, Vila Real, Portugal, 5-8.9.04, P. Morlier, J. Morais, N. Dourado (eds), UTAD (pub.), 175-181.
- [Cia4] Clair B., Thibaut B. (2003) New tools to investigate physical-mechanical behaviour of wood at the cell-wall level, IUFRO - All Division 5 Conference, Rotorua, NZ, 11-15.3.03, p. 204.
- [Cia2] Fournier M., Martin P., Chanson B., Clair B. (2000) Bending and growth strains in buttresses in some tropical trees, 3rd Plant Biomechanics Conference, Badenweiler (Freiburg), Germany, 27.8-2.9.00, 422.
- [Cia1] Clair B., Despaux G., Frezou C., Thibaut B. (2000) Transmission acoustic microscopy: a tool for wood microstructure studies, 3rd Plant Biomechanics Conference, Badenweiler (Freiburg), Germany, 27.8-2.9.00, Thieme-Verlag (pub.), 351-357.
- [Ci18] Gierlinger N., Singla P., Ruelle J., Clair B. (2007) Chemical imaging of tension wood in tropical rain forest species by Confocal Raman microscopy, Structure and function of primary and secondary cell walls. Workshop of the Cost Action E50 "Cell-wall macromolecules and reaction wood", Postdam, DE, 26-28.09.07.
- [Ci6] Fournier M., Clair B., Jaouen G., Ruelle J., Prévost M.F. (2003) Biomechanis and height growth strategies in a tropical rainforest sapling community. A key role of tree pre-stresses ?, 4th Plant Biomechanics Conference, East Lansing, U.S.A., 20-25.07.03, F.W. Telewski (ed), p. 15.
- [Ci5] Fournier M., Clair B., Ruelle J., Coutand C., Prévost M.F. (2003) Buttresses and gravitropic reorientations: are buttresses an alternative or complementary strategy to reaction wood formation ?, 4th Plant Biomechanics Conference, East Lansing, U.S.A., 20-25.07.03, F.W. Telewski (ed), p. 57.
- [Ci2] Clair B., Sugiyama J., Gril J., Thibaut B. (2003) Some ideas about the structural aspect of the gelatinous layer from tension wood, 4th Plant Biomechanics Conference, East Lansing, U.S.A., 20-25.7.03, F.W. Telewski (ed), p. 29.
- [Cna2] Clair B., Sugiyama J., Gril J., Thibaut B. (2003) Changes during drying in normal and tension wood: a way for the knowledge of its structure in the finest scales, 53th Annual Meeting of the Japan Wood Research Society, Fukuoka, Japan, 22-24.3.03, 1 p.
- [R3] Clair B., Sugiyama J. , Riekkel, C. avec Pilate G., Alméras T., Jullien D. (2007) Genesis of the tensile stress in cellulose of trees. Rapport experimental Synchrotron ESRF SC2238 (25-29/06/07), 02/08.

Prenons le temps de nous appesantir sur un exemple

ENQUETE SUR LES ORIGINES MICROSCOPIQUES DU RETRAIT PARADOXAL DU BOIS DE TENSION^a

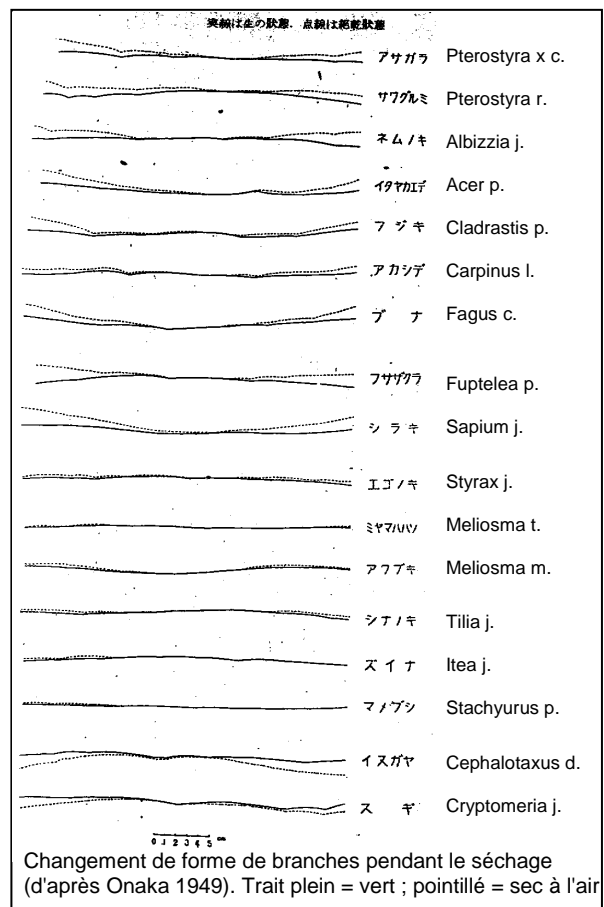
Petits pré-requis

Le bois est sujet à des variations dimensionnelles lors de son séchage. De l'ordre de 4-6 % dans la direction radiale et de 8 à 10 % dans la direction tangentielle, mais seulement de l'ordre du pour mille dans la direction longitudinale. Le retrait dans les directions R et T est une combinaison d'effets à l'échelle de la paroi et d'effets de structure liés à l'organisation et la forme des cellules. Pour la direction longitudinale, les différences de retrait s'expliquent essentiellement par les différences d'angle des microfibrilles dans la couche S₂ (qui compose la majeure partie de la paroi). En effet, la cellulose étant quasi-indéformable, les départs d'eau n'affectent que les dimensions transverses aux microfibrilles (le retrait le long des microfibrilles est quasi-nul et est maximum transverse aux microfibrilles). Ainsi, plus l'angle que forme les microfibrilles avec l'axe de la cellule (AMF) est fort, plus le retrait axial est fort et réciproquement, plus cet angle est faible plus le retrait sera faible. Ceci a été largement vérifié expérimentalement et modélisé (Barber 1968, Barrett, Schniewind *et al.* 1972, Cave 1972a, 1972b, 1978, Sassus 1998, Gril, Sassus *et al.* 1999, Yamamoto 1999).

De nombreuses victimes et quelques suspects (Etat de l'art avant 2001)

En 1949, Onaka (1949) regrette le manque d'étude concernant le retrait longitudinal du bois de tension et fait état d'une expérience comparant la flexion durant le séchage de tronçon (30 cm) de branches de différentes espèces résineux et feuillu. Il constate que la flexion se fait vers la face inférieure chez les résineux (coté bois de compression) et sur la face supérieure chez les feuillus (coté bois de tension). Et il rajoute : "Pourtant, dans certaines espèces comme *Meliosma tenuis* Maxim., *Meliosma myriantha* Sieb. et Succ. et *Tilia japonica* Smik., pour lesquelles la couche gélatineuse n'apparaît pas, cette flexion n'est pas observé. Ainsi ces changements pourraient être attribués à la présence de la couche gélatineuse. Elle doit rétrécir remarquablement dans la direction longitudinal en séchant."

En fait depuis 1937 jusque dans les années 50, plusieurs observations de retrait longitudinal fort dans des bois à couche G ont été mentionnées (Clarke 1937, Chow 1946, Onaka 1949, Akins & Pillow 1950, Pillow 1950, Terrell 1953, Wardrop & Dadswell 1955). Ces études mettent en évidence la relation entre cette couche particulière et le fort retrait mais il n'y a pas d'interprétation microscopique du



^a les articles encadrés sont joints en annexe au document

phénomène. Le lien avec la densité est étudié par plusieurs auteurs qui confirment tous l'absence de relation claire (Terrell 1953). La couche G est unanimement accusée d'être la cause du fort retrait du bois de tension à l'origine de nombreux problèmes technologiques (fente, distorsion des planches, ...).

La couche G a été découverte par Th. Hartig à la fin du 19^{ème} Siècle, elle a été successivement appelée par différents auteurs "couche cellulosique", "couche mucilagineuse", "couche cartilagineuse" ou "couche gélatineuse" à cause de sa forte teneur en cellulose, de son détachement des autres couches et de l'aspect gélatineux que lui donne son aspect gonflé irrégulier (Sanio 1860a, 1860b, 1863, Metzger 1908, Potter 1924, Cave 1972a). Par la suite et encore aujourd'hui, les scientifiques l'ont appelée couche gélatineuse (couche G). Sa structure a été décrite dès les années 30 - 40 (Wardrop & Dadswell 1955) comme très fortement cellulosique avec une forte cristallinité et un angle très faible de microfibrilles par rapport à direction de la fibre. Wardrop et Dadswell (1955) reportent la présence de pectines. Malgré une étude approfondie, ils concluent pourtant sur l'impossibilité à ce stade d'expliquer le retrait longitudinal par la microstructure.

En 1966, Norbert et Meier (1966) sont les premiers à faire des mesures de retrait microscopique. En isolant des portions de couches G par méthode ultrasonore, ils en font des mesures sous microscope optique d'abord dans l'eau puis à sec. Ils concluent que la couche G n'a pas de retrait longitudinal (ou trop faible pour être la cause du retrait longitudinal macroscopique). La couche G étant innocentée, ils cherchent dans les autres éléments de la structure les auteurs du fort retrait L.



Couche G isolée.
Gauche, dans l'eau, Droite, sec à l'air.

La couche G étant souvent décollée, ils supposent qu'elle ne contribue pas au retrait mais ne le restreint pas non plus. La couche S₂ étant généralement très fine en présence de couche G, la couche S₁ se trouve proportionnellement une couche majeure de la paroi. L'angle des microfibrilles y étant supérieur à 40°, les auteurs lui attribuent le fort retrait du bois de tension à couche G. Plus tard, Boyd (1977) soutiendra lui aussi cette hypothèse. Ces deux articles sont énormément cités et la question semble réglée.

1998 : contre-enquête

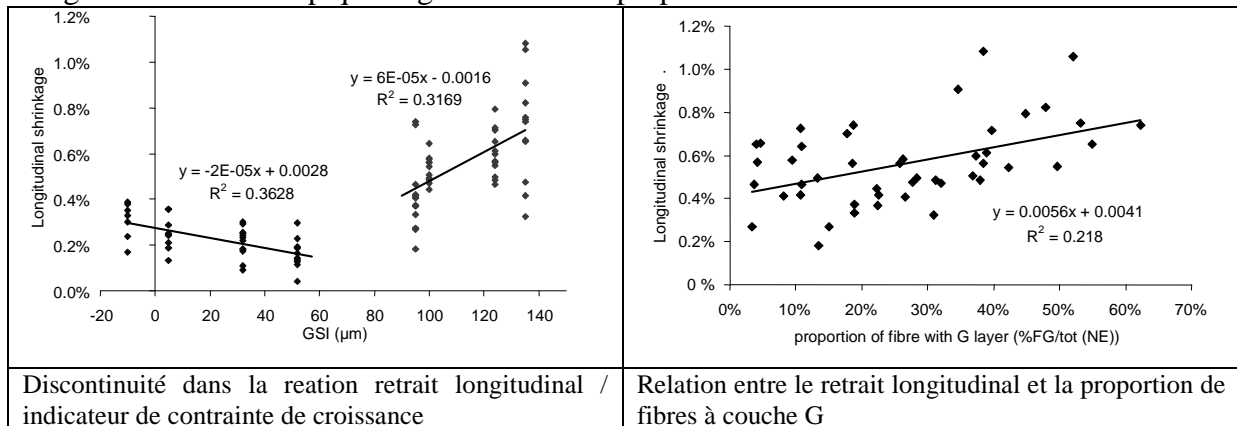
En 1998, Bernard Thibaut me propose de reprendre l'enquête. Depuis une trentaine d'années, plusieurs études confirment les observations d'un retrait fort dans le bois de tension à couche G. Nous reprenons donc une étude, similaire à tant d'autres, avec le souhait d'étudier le lien avec le niveau de contrainte dans l'arbre et des mesures de module d'élasticité qui permettront une modélisation simple d'éléments en parallèle pour quantifier une valeur de retrait des fibres à couche G.

[A3] Clair B., Ruelle J., Thibaut B. (2003) Relationship between growth stresses, mechano-physical properties and proportion of fibres with gelatinous layer in chestnut (*Castanea Sativa* Mill.), *Holzforschung*, vol. 57, 2, 189-195.

Deux arbres ont été échantillonnés pour retenir 8 valeurs de contraintes de croissance réparties uniformément entre bois normal et bois de tension. Pour chaque position (4 bois normal et 4 bois de tension), 12 éprouvettes ont été usinées sur lesquelles ont été mesurés le retrait au séchage (tangential et longitudinal), le module longitudinal en traction et la proportion de

fibre contenant une couche gélatineuse (fibre G). A cette époque, nous n'étions pas en mesure de mesurer les angles de microfibrilles (AMF).

Il en résulte que le retrait L semble gouverné par l'angle des microfibrilles dans le bois normal mais s'écarte brutalement de la tendance quand sont présentes des fibres G. Le retrait longitudinal macroscopique augmente avec la proportion de fibre G.



Cette étude n'apporte pas de résultats très différents des études antérieures mais nous permet cependant plusieurs observations parallèles :

- la forte relation entre la quantité de fibre à couche G et le niveau de contrainte tendent à montrer que la couche G en serait le moteur. Même si, en effet, les observations anatomiques la montrent souvent décollée, il apparaîtrait normal qu'elle soit adhérente dans l'arbre et dans le bois massif.
- le très fort gain de rigidité des fibres à couche G au séchage (comparativement au gain de rigidité des fibres sans couche G) confirme le comportement singulier de la couche G au séchage et commence à infirmer l'hypothèse du rôle majeur de la S₁.

2 alibis démontés

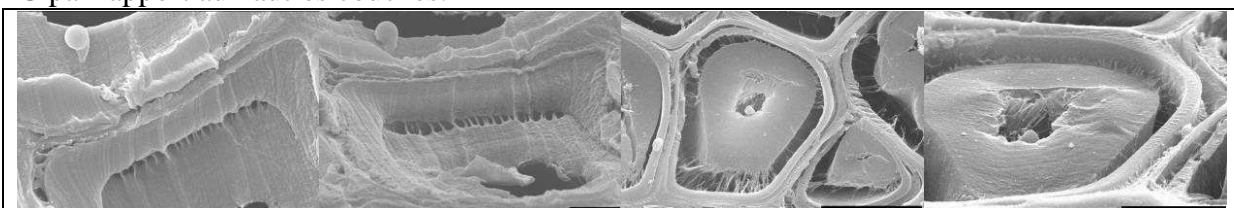
Les conclusions de Norberg et Meier doivent être réexaminées.

Suite à des discussions avec H. Yamamoto de l'université de Nagoya et profitant de nouveaux outils et notamment de la microscopie à force atomique, nous proposons une nouvelle observation de la couche G pendant son séchage.

[A2] Clair B., Thibaut B. (2001) Shrinkage of the gelatinous layer of poplar and beech tension wood, IAWA Journal, vol. 22, 2, 121-131.

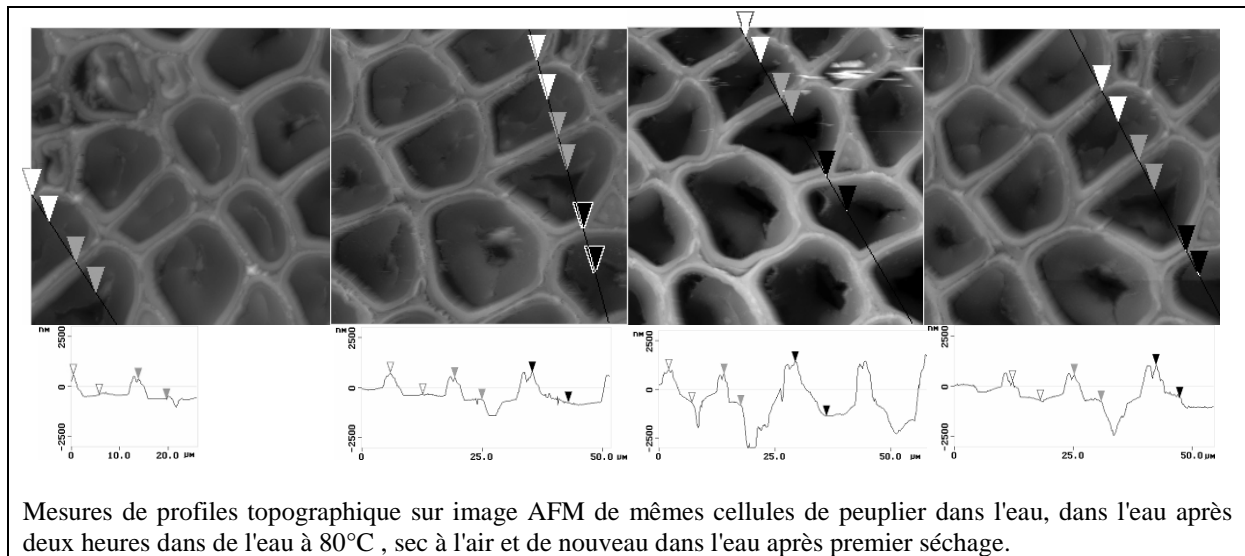
Chez du bois de tension de peuplier et de hêtre, nous réalisons deux types d'observations de fibres à couche G.

- D'abord, nous observons en microscopie électronique les conséquences du séchage sur l'état de surface en bout de fibres à couche G. L'utilisation de deux angles de vue permet une reconstruction du profil de la surface et met en évidence un retrait important de la couche G par rapport aux autres couches.



Images MEB de hêtre et de peuplier normal et à 70° d'obliquité. (— = 2 µm, 2 µm, 10 µm, 5 µm)

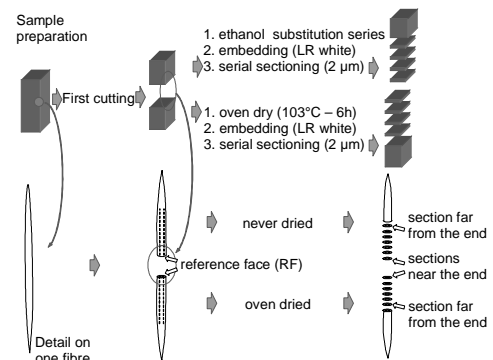
- En microscopie à force atomique, l'observation d'un même lot de cellules, dans l'eau, dans l'eau après RHT, puis à sec et enfin à nouveau dans l'eau à permis de mettre en évidence l'existence d'un retrait initial de la couche G (que nous n'avons expliqué que quelques années plus tard^b) et la partielle réversibilité du retrait de la couche G.



Un essai de quantification du retrait suggère un retrait longitudinal de la couche G de l'ordre de 4 à 5 %. Ainsi, le retrait de la couche G, loin d'être négligeable pourrait être le moteur du fort retrait longitudinal. Restait uniquement à prouver son adhérence aux autres couches, ce que nous avons fait quelques années plus tard.

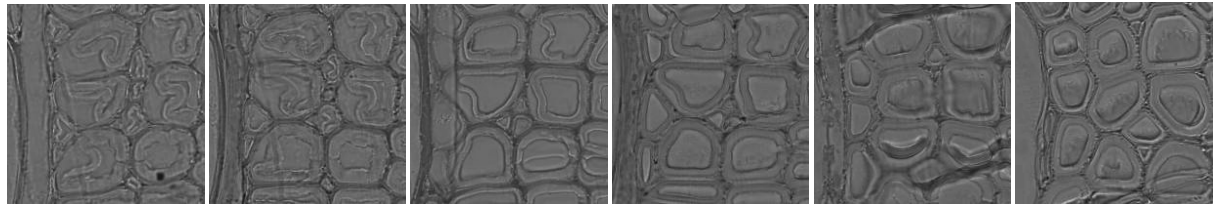
[A8] Clair B., Thibaut B., Sugiyama J. (2005) On the detachment of the gelatinous layer in tension wood fiber, *Journal of Wood Science*, vol. 51, 3, 218-221.

Deux blocs contigus de BT de peuplier frais ont été inclus dans de la résine pour bloquer les éventuels décollements qui pourraient survenir pendant la coupe. Un des deux blocs a été inclus directement depuis l'état saturé, le second a été préalablement séché. La contiguïté des blocs permet d'observer sur les mêmes fibres l'influence du séchage. Des coupes sériées sont réalisés sur les deux blocs. Proche du bord, on observe le décollement "classiquement observé" de la couche G par rapport à la couche S₂ mais à une centaine de microns du bord du bloc, on n'observe



plus aucun décollement, même dans les blocs ayant été séchés. Cette étude prouve que le décollement est un artéfact de coupe très probablement lié à l'état de contrainte de tension très fort de cette couche par rapport à la S₂. Cette hypothèse est soutenue par les résultats d'une étude conjointe^b qui a mis en évidence le gonflement en bout de la couche G lors des coupes. Ce second artéfact de bord a sûrement les mêmes causes que le décollement de la couche G et laisse penser que les microfibrilles de cellulose sont très faiblement maintenu dans le sens transverse.

^b [A7] Clair B., Gril J., Baba K., Thibaut B., Sugiyama J. (2005) Precautions for the structural analysis of the gelatinous layer in tension wood, *IAWA Journal*, vol. 26, 2, 189-195.



Observation du détachement de la couche G de BT de peuplier en fonction de la distance à la surface du bloc (10 μm ; 18 μm , 28 μm ; 50 μm ; 70 μm ; 150 μm)

L'enquête a bien progressée, la couche G se révèle être le moteur du retrait macroscopique, mais les causes du retrait de la couche G elle-même restent toujours énigmatiques.

Suspect n°1 : la cellulose

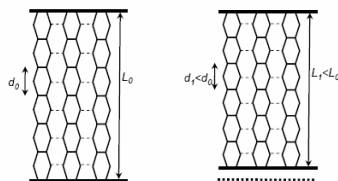
La cellulose, de par sa cristallinité, présente le grand avantage de pouvoir être observée par diffraction des rayons X. On peut ainsi mesurer les déformations des macromolécules de cellulose.

Des expérimentations, mises en place avec pour premier objectif d'évaluer l'état mécanique de la cellulose dans l'arbre et après relaxation des contraintes, ont donné l'occasion de regarder le comportement de la cellulose durant le séchage.

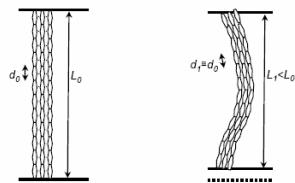
[A11] Clair B., Almérás T., Yamamoto H., Okuyama T., Sugiyama J. (2006) Mechanical behavior of cellulose microfibrils in tension wood in relation with maturation stress generation, *Biophysical Journal*, vol. 91, 3, 1128-1135.

Un même lot d'éprouvettes de BT de peuplier a été observé avant et après séchage en diffraction X. On observe un retrait des macromolécules de cellulose entre l'état saturé et l'état sec. Mais ce retrait s'avère n'être que de quelques centaines de microdéformations ($\mu\text{m}/\text{m}$) alors que le retrait macroscopique s'élève à plusieurs milliers. La première hypothèse formulée est que les autres composants de la couche G exercent une forte contrainte sur la cellulose au point de provoquer son flambement. Cette hypothèse n'est cependant pas

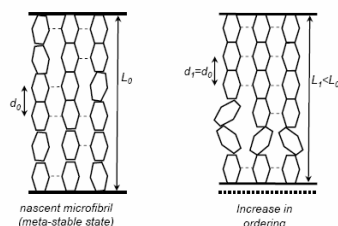
A. Change in lattice distance:



B. Microfibril buckling:



C. Re-organization of the meta-stable crystal:



totalement convaincante, si l'on considère qu'il y a tout de même eu un retrait non nul du cristal de cellulose. Est avancée alors une hypothèse sur une réorganisation de la cellulose pendant le départ d'eau lui permettant de quitter un état natif métastable pour accéder à un état plus stable. Cette seconde hypothèse s'accorderait bien avec nos observations de forte rigidification du BT pendant le séchage mais les niveaux de déformation macroscopique ne semblent pas compatibles.

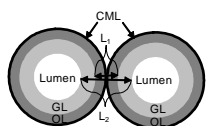
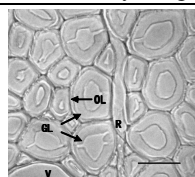
	Specimen 1	Specimen 2
Lattice spacing (nm)		
Water-saturated	0.25820	0.25824
Oven-dried	0.25818	0.25814
Strain ($\mu\text{m}/\text{m}$)		
Lattice strain	-85	-409
Macroscopic strain	-8000/-10000	

Changement de taille de cristal de cellulose et déformation macroscopique de bois de tension de *P. euramericana*

Enquête sur la composante non-cellulosique de la couche G

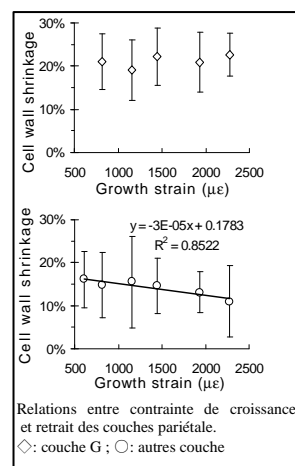
Nous poursuivons l'investigation avec une attention particulière sur ce qu'il y a entre les microfibrilles de cellulose. Nous nous focalisons donc pour un temps sur le comportement transverse de la couche G. Les hypothèses de la forte hygroscopicité de la couche G s'appuient toutes sur la comparaison de l'épaisseur de la couche G mesurée sur coupe ou sur couche G isolée, alors que nos études ont montré que hors contexte cellulaire, la couche G apparaissait artificiellement gonflée. Le retrait de séchage observé pourrait n'être que le retour aux dimensions initiales ? D'autant que tous les auteurs ne sont pas d'accord sur le fort retrait macroscopique transverse du bois de tension. Pour en avoir le cœur net, nous entreprenons une étude comparant les épaisseurs de paroi loin de tout artefact.

[A14] Fang C., Clair B., Alméras T., Gril J. (2007) Transverse shrinkage in G-fibers as a function of cell wall layering and growth strain, *Wood science and technology*, vol. 41, 8, 659-671.



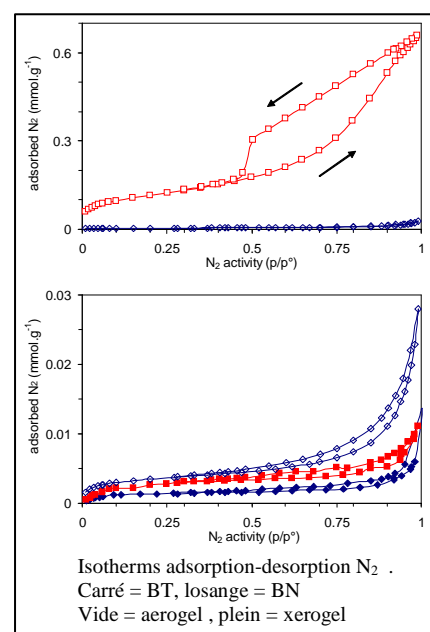
Selon un protocole similaire à l'étude du décollement de la couche G, nous étudions cette fois cinq échantillons de bois de tension de niveaux de contraintes croissant.

Les comparaisons d'épaisseurs au sein d'une même fibre entre partie séchée et partie non séchée se sont révélées inexploitable à cause de la variabilité de l'épaisseur de la couche G le long de la fibre. Cependant, le nombre de mesures est statistiquement suffisant pour comparer les moyennes sur un même lot de fibres. Le retrait transverse de la couche G est évalué à 20-22%. Il est à noter que, quel que soit le niveau de contrainte ou l'épaisseur de la couche G, le retrait de la couche elle-même varie peu. Un tel retrait nous fait émettre l'hypothèse d'une structure très poreuse entre les microfibrilles. Nous nous orientons donc vers les compétences des chimistes en espérant mettre en évidence une porosité dans la couche G.



[A15] Clair B., Gril J., Di Renzo F., Yamamoto H., Quignard F. (2008) Characterization of a gel in the cell wall to elucidate the paradoxical shrinkage of tension wood, *Biomacromolecules*, vol. 9, 2, 494-498.

Deux lots de bois normal et de bois de tension de châtaignier sont séchés. L'un est séché à l'étuve à 102°C, l'autre est déshydraté à l'éthanol, puis échange au CO₂ liquide et subit un séchage supercritique. Cette seconde technique permet un départ de l'eau sans tension de vapeur et donc sans collapse d'éventuelles porosités. Puis la porosité des échantillons est mesurée par la technique des isothermes d'adsorption d'azote. En parallèle, des mesures macroscopiques comparent le retrait macroscopique des échantillons. Les résultats sont sans équivoque, le séchage supercritique prévient l'essentiel du retrait macroscopique du bois de tension et permet de mettre en évidence une très forte "meso-porosité" (= pores entre 2 et 50 nm) 30 fois supérieure à ce que l'on peut mesurer dans le bois normal. Les mesures réalisées sur le bois séché à l'étuve montrent que le fort retrait longitudinal s'accompagne de la perte de toute porosité. Ceci met en évidence la présence d'une structure de type gel dans la paroi, confirmant les intuitions



des botanistes de la fin du 19^{ème} siècle. Le collapse du gel, profitant de la faible rigidité transverse des microfibrilles entraîne leur flambement provoquant le fort retrait longitudinal. Il semble que la fin de l'enquête soit proche... pourtant...

Quand "los tropicanos" jouent les trouble-fêtes

Mais qu'en est il alors des bois de tension sans couche G ? Onaka (1949) et Fisher et Stevenson (1981) nous rapportent que un tiers des espèces n'en produisent pas. Cependant, ces études ayant été réalisées sans mesure préalable de l'état de contrainte validant mécaniquement l'état de tension, on peut se demander si les espèces sans couche G correspondent à des observations sur des arbres qui auraient moins réagi.

[A10] Clair B., Ruelle J., Beauchêne J., Prevost M.F., Fournier M. (2006) Tension wood and opposite wood in 21 tropical rain forest species. 1. Occurrence and efficiency of G-layer, IAWA Journal, vol. 27, 3, 329–338.

Une étude réalisée sur 21 espèces de forêt tropicale a montré qu'en effet, un tiers seulement des espèces comporte de la couche G. Cette étude montre que la présence de couche G n'est pas associée à des mesures de contrainte plus forte et 'couche G ou pas' les bois de tension ont systématiquement un angle des microfibrilles faible.

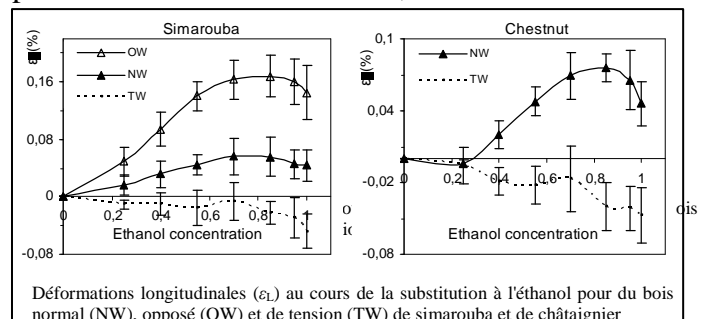
Or récemment, J. Ruelle (2007) a montré que même les bois sans couche G (et notamment le Simarouba) ont un retrait plus élevé dans le bois de tension que dans le bois normal. Ce retrait est seulement 2 fois supérieur à celui du bois normal mais reste paradoxal si l'on considère que l'angle des microfibrilles y est plus faible que dans le bois normal.

Un second coupable

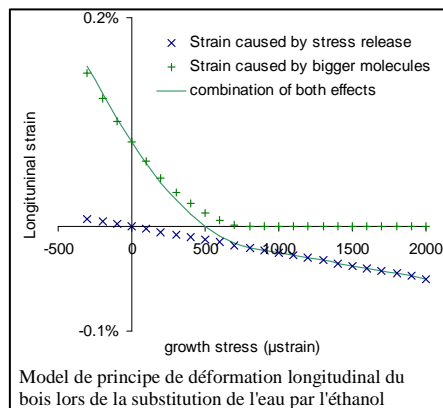
Le second coupable s'est trahi de lui-même et nous l'avons surpris par hasard alors que nous cherchions à optimiser le protocole de préparation pour les mesures d'isothermes par adsorption d'azote.

[A18] Chang S.S., Clair B., Gril J., Yamamoto H., Quignard F. (soumis 2008) Deformation induced by ethanol substitution in normal and tension wood of chestnut (*Castanea sativa* Mill.) and simarouba (*Simarouba amara* Aubl.), Wood science and technology.

Dans cette étude nous comparons les variations dimensionnelles (L et T) de bois normal et de bois de tension de châtaignier et de simarouba lors de la déshydratation progressive à l'éthanol. Des mesures d'angle des microfibrilles sont réalisées pour discriminer les types de bois. Dans le bois normal, comme attendu, le plus fort encombrement de l'éthanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) par rapport à l'eau (H_2O) fait gonfler l'espace entre les microfibrilles, on obtient donc un gonflement d'autant plus grand que l'AMF est fort. En revanche, dans le bois de tension où l'on attendait un gonflement nul ou faible, nous mesurons un retrait non négligeable à la fois chez le simarouba et le châtaignier. Celui-ci ne pouvant pas s'expliquer par la structure particulière du gel (puisque le simarouba n'a pas de couche G), nous proposons une explication mettant en jeu la forte contrainte de tension exercée par la couche tendue (G pour le châtaignier ou S_2 pour le simarouba) sur les autres couches (OC). Lors d'échanges moléculaires, ici le remplacement de molécules d'eau par l'éthanol, il y aurait une petite mobilité permettant la déformation des OC favorisant une relaxation globale accompagnée d'une déformation longitudinale macroscopique. Notons que

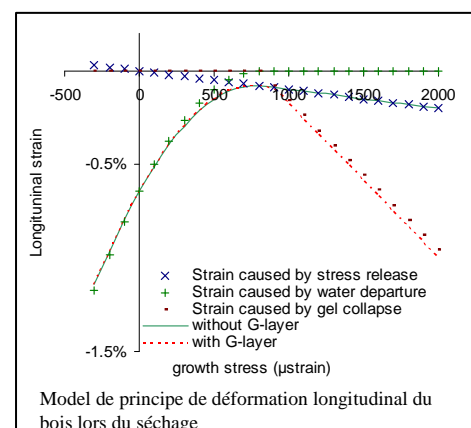


ce phénomène est analogue à la recouvrance hygrothermique (RHT) (Gril & Thibaut 1994), qui permet l'expression de la part de déformation de maturation bloquée dans la paroi cellulaire.



Ainsi, la déformation macroscopique mesurée est la combinaison de deux effets d'origines différentes gouvernés par deux mécanismes différents : le gonflement sous l'effet de plus grosses molécules qui dépend de l'angle des microfibrilles et les déformations de recouvrance qui dépendent du niveau des déformations bloquées. La relation générale entre contrainte de croissance et angle des microfibrilles étant connue, on peut donner une représentation de l'origine des déformations longitudinales en fonction de l'état de contrainte de l'échantillon (ci-contre).

Par extension de ce modèle, nous proposons un modèle pour le retrait de séchage selon le même principe pour les bois sans couche G et avec un troisième mécanisme pour la prise en compte du collapse de la couche G. La combinaison des effets peut se schématiser selon le même principe (ci-contre). Ici, l'effet croissant du retrait de collapse est lié à la proportion croissante de couche G quand les contraintes de croissance augmentent^c.



Ce modèle demande à être validé expérimentalement et déjà quelques idées émergent pour tester les hypothèses séparément. Il sera intéressant de comparer des mesures de retrait au séchage sur des lots jumeaux de bois de tension (avec et sans couche G) ayant subi (ou pas) une recouvrance hygrothermique (passage à 80°C pendant 2h). Ainsi, les bois de tension sans couche G relaxés ne devraient plus produire de retrait au séchage. De plus, maintenant que nous sommes équipés au laboratoire pour les mesures par diffraction X, il sera intéressant de suivre l'état de tension de la cellulose pendant tout l'essai afin de confirmer le rôle moteur de la cellulose dans la phase "libération des déformations bloquées" du retrait et son absence d'implication dans la phase "collapse du gel".

References

- Akins V. & M.Y. Pillow. 1950. Occurrence of gelatinous fibers and their effect upon properties of hardwood species, *Proc. Forest Products Research Society*.
- Barber N.F. 1968. A Theoretical Model of Shrinking Wood, *Holzforschung*, **22**: 4, 97-103.
- Barrett J.D., A.P. Schniewind & R.L. Taylor. 1972. Theoretical Shrinkage Model for Wood Cell Wall, *Wood Science*, **4**, 178-192.
- Boyd J.D. 1977. Relationship between fibre morphology and shrinkage of wood, *Wood Science and Technology*, **11**, 3-22.
- Cave I.D. 1972a. Swelling of a fibre reinforced composite in which the matrix is water reactive, *Wood Science and Technology*, **6**, 157-161.

^c [A17] Fang C.H., Clair B., Gril J., Liu S.Q. (in press 2008) Growth stresses are highly controlled by the amount of G-layer in poplar tension wood, *IAWA Journal*.

- Cave I.D. 1972b. A Theory of the Shrinkage of Wood, *Wood Science and Technology*, **6**, 284-292.
- Cave I.D. 1978. Modelling Moisture-Related Mechanical Properties of Wood. Part I: Properties of the Wood Constituents, *Wood Science and Technology*, **12**, 75-86.
- Chow K.Y. 1946. A comparative study of the structure and composition of Tension Wood in Beech (*Fagus sylvatica* L.), *Forestry*, **20**, 62-77.
- Clarke S.H. 1937. The distribution, structure and properties of tension wood in beech (*Fagus sylvatica* L.), *Journal of Forestry*, **11**: 2, 85-91.
- Fisher J.B. & J.W. Stevenson. 1981. Occurrence of reaction wood in branches of dicotyledons and its role in tree architecture, *Botanical gazette*, **142**: 1, 82-95.
- Gril J. & B. Thibaut. 1994. Tree mechanics and wood mechanics: relating hygrothermal recovery of green wood to the maturation process, *Annales des Sciences Forestières*, **51**, 329-338.
- Gril J., F. Sassus, H. Yamamoto & D. Guitard. 1999. Maturation and drying strain of wood in longitudinal direction: a single-fibre mechanical model, *3rd Workshop on Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation softwares (IUFRO WP S5.01.04 "Biological Improvement of Wood Properties")*, La Londe-Les-Maures, 5-12.9.99, G. Nepveu (ed), ERQB-INRA Nancy (pub.), 309-313.
- Metzger K. 1908. Über das Konstruktionsprinzip des sekundären Holzkörpers, *Naturwissenschaftliche Zeitschrift für Forst- und Landwirtschaft*, **6**: 5, 249-273.
- Norberg H. & H. Meier. 1966. Physical and chemical properties of the gelatinous layer in tension wood fibres of Aspen (*Populus tremula* L.), *Holzforschung*, **20**: 6, 174-178.
- Onaka F. 1949. Studies on compression and tension wood, *Wood research, Bulletin of the Wood research Institute, Kyoto University, Japan*, **24**: 3, 1-88.
- Pillow M.Y. 1950. Presence of Tension Wood in Mahogany in Relation to Longitudinal Shrinkage, *Report US Forest Product Laboratory*.
- Potter M.C. 1924. On the occurrence of cellulose in the xylem of woody stems, *Annals of botany*, **18**, 121-140.
- Ruelle J., J. Beauchêne, A. Thibaut & B. Thibaut. 2007. Comparison of physical and mechanical properties of tension and opposite wood from ten tropical rainforest trees from different species, *Annals of forest science*, **64**: 5, 503-510.
- Sanio C. 1860a. Einige Bemerkungen über den Bau des Holzes - II. Ueber die tertiäre verdickungsschicht der holzzellen, *Botanische Zeitung*, **18**: 23, 201-204.
- Sanio C. 1860b. Einige Bemerkungen über den Bau des Holzes - I. Ueber den Bau des Typfels und Hofes, *Botanische Zeitung*, **18**: 22, 193-200.
- Sanio C. 1863. Vergleichende Untersuchungen über die elementarorgane des Holzkörpers. II Bastfaserähnliches system, *Botanische Zeitung*, **21**: 13, 101-111.
- Sassus F. 1998. Déformations de maturation et propriétés du bois de tension chez le hêtre et le peuplier : mesures et modèles, *Sciences du bois*, ENGREF, Montpellier.
- Terrell B. 1953. Distribution of tension wood and its relation to longitudinal shrinkage in aspen, *Plant Foods for Human Nutrition (Formerly Qualitas Plantarum)*.
- Wardrop A.B. & H.E. Dadswell. 1955. The nature of reaction wood. IV. Variations in cell wall organization of tension wood fibres, *Australian journal of botany*, **3**: 2, 177-189.
- Yamamoto H. 1999. A model of anisotropic swelling and shrinking process of wood. Part 1. Generalization of Barber's wood fiber model., *Wood Science and Technology*, **33**, 311-325.

COMMENT J'ENVISAGE LA SUITE

Objectif général

L'objectif, *in fine*, de mes recherches est la meilleure connaissance du matériau bois en vue de son plus large emploi en substitution à d'autres matériaux aujourd'hui abondamment utilisés malgré leur impact environnemental plus défavorable. Il s'agit donc de mieux décrire sa structure et son comportement aux différentes échelles.

La meilleure connaissance du bois et de son comportement dans tous les stades de son élaboration et de sa transformation présente trois grands enjeux. D'une part, la maîtrise de sa synthèse et des processus de transformation peut nous permettre de contrôler voire modifier les propriétés du matériau pour les dédier à des utilisations de plus en plus spécifiques. D'autre part, l'exploration de la diversité de structures et de propriétés des bois (d'après leur espèce ou leurs conditions particulières de croissance) nous amène devant une telle diversité de produits que leur caractérisation systématique est nécessaire pour utiliser au mieux le bon bois pour le bon usage. Enfin, l'exploration de la structure interne et notamment celle des bois atypiques aux propriétés paradoxales tel le bois de tension pourra aussi, par biomimétisme, donner les modèles des matériaux de demain.

Dans cette entreprise, nous nous intéressons à tous les stades d'élaboration du matériau. En premier lieu à sa genèse : élaboration et processus de mise sous contrainte dans l'arbre en réactivité aux aléas du contexte forestier. Ensuite aux modifications du bois dans l'arbre vivant. Enfin, à sa réaction aux transformations en vue de son utilisation (abattage, sciage, séchage).

Détail sur la suite des événements

J'ai fait le choix dans ce document de mettre en relief mes travaux sur le retrait longitudinal du bois de tension car il me semble que c'est le sujet sur lequel j'ai eu le plus de cohérence et de continuité. Cependant, comme présenté dans la présentation synthétique de mes activités de recherche, j'ai abordé de nombreux autres thèmes, depuis la structure de la cellulose [A19] jusqu'au comportement à l'échelle de l'arbre [A6]. Chacune de mes expérimentations a été très instructive sur les mécanismes utilisés par les arbres pour leur tenue mécanique, avec notamment plusieurs résultats sur la nature et le comportement de la paroi du bois de tension. Aujourd'hui, la connaissance croissante de la structure et du comportement du bois de tension permet d'envisager à court terme une bonne compréhension des mécanismes qui régissent la mise en tension du bois dans l'arbre. Je souhaite donc désormais me consacrer à cette question de l'origine des contraintes de croissance. Cette question anime énormément la communauté internationale ces quelques dernières années, et je pense que, en tant que mécaniciens avec T. Alméras et J. Gril, soutenus par un réseau de physiciens, chimistes et biologistes, nous avons notre contribution à apporter.

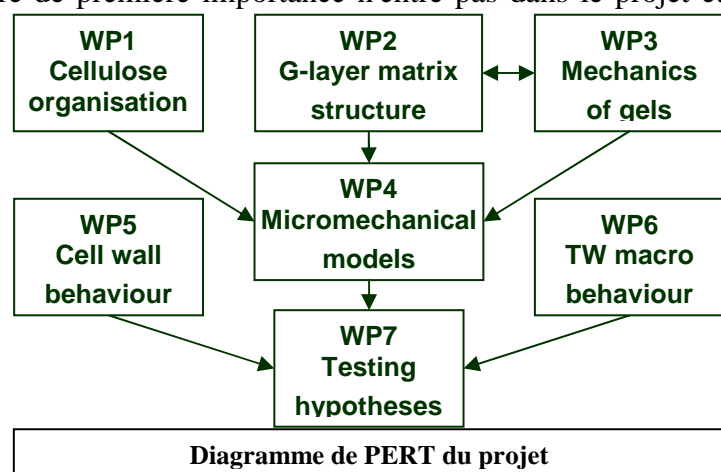
Nous avons vu que le fort retrait longitudinal était le fruit d'un couplage entre recouvrance des déformations bloquées pendant la maturation et processus de sorption dépendant de la microstructure. On peut alors imaginer que la génération des contraintes de croissance résulte elle aussi de couplages hygromécaniques mettant en jeu des variations locales d'humidité de la paroi pendant la mise sous tension de la cellulose.

Je souhaite me rapprocher d'avantage des biochimistes pour confronter nos approches biophysiques à une meilleure connaissance de la réalité biologique du milieu étudié. C'est ce que j'ai initié en proposant à Gille Pilate de participer au projet synchrotron et tout laisse à penser que cette collaboration va plutôt se renforcer dans l'avenir. Je pense poursuivre la collaboration avec Christian Rieckel de l'ESRF. Le synchrotron est un outil précieux pour répondre à nos questions. Cependant, son utilisation est trop rare et incertaine, c'est pourquoi, je développe en parallèle sur Montpellier les outils de diffraction X nécessaires pour répondre à nos questions (thèse de Cédric Montero).

Je bénéficie aujourd'hui au LMGC d'un environnement très favorable à mes recherches, avec la complicité de Tancrede Alméras et Joseph Gril pour la modélisation du comportement de la paroi cellulaire, et les compétences forte dans d'autres équipes pour la compréhension et la modélisation des couplages dans les milieux hétérogènes.

Enfin, les capacités expérimentales du laboratoire ont considérablement évoluées ces quelques dernières années (salle d'anatomie, machine d'essai dynamique, accès aux meilleurs outils de microscopie électronique (ESEM), ou à force atomique (AFM) et de diffraction X) et j'ai tissé un réseau de collaboration national et international qui nous permet de tester expérimentalement la plupart des hypothèses que nous formulons. Tout ceci me laisse espérer que nous serons capable en quelques années de donner des réponses satisfaisantes à la grande question de l'origine des précontraintes dans le bois.

Afin d'obtenir les moyens financiers et humains nécessaires pour avancer sur cette question, j'ai récemment répondu à un appel à projet du conseil européen de la recherche (ERC Starting Grant 2009) pour la création d'une jeune équipe concentré sur la question de la génération des contraintes de croissance. Le montage de ce projet (co-rédigé avec T. Alméras) a été l'occasion de faire un bilan des connaissances actuelles et de lister les points de blocage pour aller plus loin. Le programme de recherche se concentre sur la compréhension de la mise en place des contraintes de croissance dans le cas particulier du bois de tension à couche G. Ceci est à considérer comme une première étape avant d'ouvrir la question au cas plus général des bois sans couche G puis du bois normal. Le projet s'organise en 7 groupes de travail. Trois groupes sont dédiés à la description de la structure et du comportement des composants de la paroi cellulaire. 1. Organisation de la cellulose dans la paroi, 2. Structure de la composante gélatineuse, 3. Comportement mécanique de la composante gélatineuse (le comportement de la cellulose qui est aussi un paramètre de première importance n'entre pas dans le projet et s'appuiera sur des données bibliographiques). Structure et comportement de la matrice gélatineuse et du réseau microfibrillaire sont les données d'entrée qui permettront de formuler des modèles de paroi (groupe 4) qui seront validés et ajustés (groupe 7) par des mesures à l'échelle du composite (comportement de la paroi cellulaire) réalisées par le groupe 5 et des mesures macroscopiques (groupe 6).



Les bases bibliographiques et le détail des tâches dans chaque groupe sont décrit dans le document du projet, joint en annexe.

Financement ou pas, ce document décrit mon programme de recherche pour les années qui viennent ; 5 ans si le projet est accepté, probablement plus si il ne l'est pas...