HAL open science

Construction et déconstruction de l'arbre : la cascade des usages du bois

Bernard Thibaut

To cite this version:

Bernard Thibaut. Construction et déconstruction de l'arbre : la cascade des usages du bois. Mécanique des matériaux biosourcés - MECAMAT 2014, Jan 2014, Aussois, France. hal-01975901

HAL Id: hal-01975901

https://hal.science/hal-01975901

Submitted on 9 Jan 2019

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.

CONSTRUCTION ET DECONSTRUCTION DE L'ARBRE : LA CASCADE DES USAGES DU BOIS.

B. Thibaut, *Laboratoire de mécanique et génie civil UMR 5508, Campus St Priest - cc 048, 860 Route de St Priest - 34090 Montpellier, France. Téléphone : 06 38 79 86 16, Télécopie : bernard.thibaut@univ-montp2.fr*

Mots clés : bois, arbre, structure, construction, déconstruction

1. INTRODUCTION

Le bois est utilisé depuis très longtemps comme matériau par les humains (bois d'œuvre), mais c'est aussi un compartiment clé de l'arbre. Il représente l'essentiel de la biomasse aérienne présente dans l'écosystème forestier au point que le mot bois est aussi utilisé pour désigner des arbres ou des forêts. En sciences des matériaux, la phase d'élaboration du matériau est un chapitre essentiel. Par analogie il est courant de qualifier l'arbre « d'usine à bois ».
Néanmoins l'étude de la vie d'un arbre révèle plutôt une histoire de « ***construction de l'arbre par la croissance du compartiment bois*** ». Le bois vivant de l'arbre est plus complexe que le bois mort de l'ingénieur car il intègre des lieux (cellules souches) et des processus de croissance : allongement et ramification des axes (croissance primaire) ; augmentation de la section des axes (croissance secondaire), ainsi que des fonctions de protection externe (écorce) et interne (duramen). Un arbre, avant sa récolte est une construction sophistiquée, et il va falloir la déconstruire pour obtenir des éléments de matériau ou des matières premières.

2. LE COMPARTIMENT BOIS DE L'ARBRE

L'existence d'un énorme compartiment « bois » (Fig.1) entre l'ensemble des poils racinaires et l'ensemble des feuilles caractérise les arbres dans le monde végétal (Raven et al 2007). La fonction du chevelu racinaire est de capter et filtrer l'eau du sol avec les éléments minéraux nécessaires à la plante. Celle du feuillage est de réaliser la photosynthèse pour fabriquer des carbohydrates. Le compartiment bois comporte une partie aérienne (tronc et branches) et une partie souterraine (système racinaire). Dans la suite nous ne parlerons plus que de la partie aérienne, la plus connue et la plus utilisée.
La fonction de base du bois est mécanique : construire une structure complexe et souvent très grande, l'ancrer dans le sol, maintenir la géométrie souhaitée au cours de temps longs, réagir et adapter cette structure aux différents aléas de l'histoire de l'arbre et de son environnement. Une seconde fonction obligatoire relevant de la mécanique des fluides est le transport de la sève, brute du bas vers le haut, élaborée du haut vers le bas.
Deux autres fonctions sont nécessaires pour la sécurité du compartiment bois : une fonction de stockage de nutiments et une fonction de défense coutre les agressions externes, biologiques ou physico-chimiques. Cette dernière se fait grâce à 3 mécanismes principaux : i) une protection externe par l'écorce, ii) une protection interne passive par la duraminisation (synthèse et positionnement dans le bois de cœur de molécules bio-actives à longue durée d'action) et iii) une protection biologique active grâce à la survie de cellules spécialisées dans la biosynthèse et le stockage qui restent vivantes plus longtemps.

2.1 Structure et genèse du compartiment bois aux différentes échelles

Il est classique de considérer 3 échelles principales de description : i) la géométrie générale 3D de la structure arborée, ii) l'anatomie des portions d'éléments ligneux et iii) l'ultrastructure des parois des cellules végétales. Pour éviter des allers retours inutiles, la description est faite en parallèle avec les processus de genèse du compartiment bois lors de sa croissance.

2.1.1 Géométrie du compartiment bois de l'arbre. Au premier regard, le bois de l'arbre est un ensemble ramifié de poutres très élancées (axes), semi-encastrées à leur extrémité la plus grosse.

Chaque axe comporte des ensembles de cellules souches (méristèmes) capable de se diviser et de produire de nouvelles cellules. Les bourgeons (terminal et latéral) réalisent la ramification et l'allongement par l'extrémité de l'axe (croissance primaire). Les assises libéro-ligneuse (cambium) et subéro-phellodermique (phellogène) qui forment deux manchons concentriques à l'extérieur de chaque axe (Fig.2) permettent la croissance en épaisseur de la section (croissance secondaire). Ce mode de croissance induit un référentiel orthotrope cylindrique pour les axes avec les notations L (longitudinal), R (radial, direction d'épaississement de l'axe) et T (orthogonal aux deux autres.
Les deux mécanismes de croissance par division cellulaire durent toute la vie de l'arbre et sont interrompus pendant des périodes critiques (hiver ou sècheresse). Généralement, les phases d'interruption sont marquées par des indicateurs le long des axes et dans la section (cernes de croissance). Chaque axe est donc un empilement de couches produites successivement dans le temps et chaque jonction d'axes possède une résistance mécanique remarquable en raison de l'imbrication des couches successives des deux axes en croisance depuis le début de la ramification (Fig.3).
La manière dont se font les ramifications et les rythmes de croissance lisibles dans la structure dépend de l'espèce d'arbre (au senss botanique du terme) au travers d'un « ***modèle architectural*** » catalogué par la discipline scientifique de l'architecture végétale (Hallé & Oldeman 1970).

2.1.2 Anatomie du xylème. Le xylème est la partie la plus interne de chaque axe, produite vers l'intérieur par le cambium (Raven et al 2007). C'est cette partie qui joue l'essentiel du rôle mécanique structural du bois dans l'arbre. La division centripète du cambium produit deux types de cellules, les unes orientées dans la longueur de l'axe, qui deviendront les éléments i) de soutien (fibres pour les feuillus, tracheides pour les résineux), ii) de conduction (vaisseaux pour les feuillus, tracheides pour les résineux) et iii) de biosynthèse-stockage de nutiments et molécules bioactives (parenchymes axiaux), les autres orientées radialement, en continuité depuis la moelle (centre biologique de l'axe), qui deviendront les parenchymes radiaux (rayons médullaires).
La spécialisation des cellules et leur transformation par dilatation : très fort allongement pour les fibres, fort grossissement en diamètre pour les vaisseaux, se fait immédiatement après la division, lorsque les parois cellulaires sont encore très fines et très extensibles. Cela donne un matériau cellulaire caractéristique des bois, possédant déjà une forte anisotropie morphologique en raison de de l'élancement des fibres, avec un rapport 100 environ entre longueur et diamètre (Fig.4).
La nécessité de transporter des fluides entre compartiments du xylème, se traduit par un ensemble de communications entre cellules par le biais de « trous » dans les parois cellulaires : les perforations aux extrémités des cellules de vaisseaux et les ponctuations sur les parois latérales des cellules (notamment aux croisements avec des cellules de parenchymes). Les ponctuations sont organisées de manière à pouvoir jouer le rôle de clapet en cas de risque d'embolie et de permettre la montée de la sève sur des distances pouvant atteindre 100 mètres par traction sur la colonne de liquide.
Au total cela donne une microstructure complexe observable en microscopie optique ou en micotomographie (images 3D). Chaque espèce possède un schéma de base d'anatomie du bois : ***le plan ligneux*** défini par une série de critères répertoriés par une instance internationale (IAWA 1989 & 2004), décrivant la forme et l'organisation des éléments cellulaires ainsi que des jeux de perforation et de ponctuation. Il faut y ajouter des éléments accessoires plutôt dédiés à la protection du bois et présents dans certaines espèces comme des cellules à huile ou des caneaux résinifères.
L'ensemble des arbres indigènes de la forêt française hexagonale représente environ 120 plans ligneux, les abres indigénes de la forêt française de Guyane comportent plus de 1500 plans ligneux.

2.1.3 *Ultrastructure de la paroi cellulaire*. Durant la dilatation des cellules, leur paroi (lamelle miyoyenne) reste très fine. Pour les fibres (y compris les trachéides) la paroi cellulaire va s'épaissir par l'intérieur, par dépôt de couches successives constituées de 3 types de polymères : la cellulose cristalline organisée en nanofibres orientées, les hémicelluloses au contact direct des fibrilles de cellulose et la lignine sensiblement isotrope. Chacune des couches est ainsi un composite à fibre (Fig.5) où le complexe lignine + hémicelluloses joue le rôle de matrice. Globalement la paroi cellulaire d'une fibre comporte i) la lamelle mitoyenne (commune avec sa voisine), ii) une paroi primaire (P) très fine (un dizièmes de µm) et iii) une paroi secondaire elle-même subdivisée en 3

couches : S1 très fine aussi (0,2 à 0,5 µm) où les nanofibres de cellulose forment un angle élevé (70°) avec l'axe de la fibre, S2 épaisse (quelques µm) où les nanofibres de cellulose forment un angle faible avec l'axe de la fibre, c'est cet angle qui est appelé angle des microfibrilles (AMF) ; S3 parfois absente est similaire à S1 pour l'épaisseur et l'orientation des nanofibres de cellulose.
La phase de mise en place de ces couches appelée maturation, dure deux à 3 semaines avant la mort cellulaire.Pendant le processus de maturation, la nouvelle couche de fois formée passe d'un état mécanique très souple à un état très rigide. Si cette maturation pouvait s'exprimer librement, elle serait accompagnée de petites déformations longitudinale et transverse, de l'ordre de 0,1 à 0,5% (déformations de maturation). En fait la nouvelle couche en formation est adhérente au cylindre interne de xylème très rigide, la déformation potentielle est empêchée, ce qui génére l'apparition de contraintes élevées en fin de processus. Ce moyen de générer des forces dans les axes est commun à toutes les espèces. Dans le cas « standard » (bois dit normal), une contrainte de traction est générée dans la direction axiale et une contrainte de compression dans la direction tangentielle.

2.1.4 Chimie de la matrice. La matrice est composée de types de polymères: les hémicelluloses et la lignine, et de petites molécules bioactives (les extractibles) logées dans les cavités nanoscopiques de la matrice avec des liaisons plus faibles permettant de les extraire par différents solvants. Les hémicelluloses du bois comportent 3 grands groupes : les xyloglucanes, les xylanes et les mannanes. Dont certains peuvent être présents uniquement chez les feuillus ou les conifères.La lignine comporte 3 monomères de base : les unités *p*-hydroxyphényl (H), guaïacyl (G) et siryngyl (S). La présence des 3 types de monomères et leurs proportions peuvent aussi varier entre grandes familles.
Les extractibles sont principalement mis en place lors de la mort cellulaire programmée des dernières cellules vivantes du xylème (les parenchymes) pendant la duraminisation qui a lieu plusieurs années après la genèse de la couche de bois considérée. La partie interne du xylème ainsi « dopée » par ce cocktail de molécules (souvent 50 à 100 molécules différentes par espèce) est appelée duramen. Elle est généralement colorée alors que la partie externe encore vivante, appelée l'aubier est génralement « blanche ». L'ensemble des extractibles constitue une « signature chimique » de chaque espèce, qui vient compléter le plan ligneux pour l'identification.

2.1.5 Eléments minéraux. Les bois contiennent toujours une faible quantité (1% environ) d'éléments minéraux (calcium, silicium, aluminium etc.) que l'on retrouve dans les cendres. La concentration massique de chacun d'entre eux ne dépasse généralement pas quelques dizaines de ppm (10^{-6}). Néanmoins plusieurs espèces sont des hyper-accumulateurs (jsqu'à 1 ou 2%) de minéraux dans leur xylème (cas de la silice ou de l'aluminium). Ces présences exceptionnelles peuvent avoir des conséquences du point de vue mécanique (usure des outils de coupe due à la silice).

2.1.6 L'eau dans le bois. Le xylème de l'arbre contient une grande quantité d'eau sous deux états: i) l'eau de « remplissage » contenue dans la cavité des cellules ; en moyenne cette « eau libre » occupe la moitié des cavités, ii) l'eau de « constitution », molécules présentes, avec des liaisons faibles, dans les nanopores de la matrice ; en moyenne cette « eau adsorbée » représente 30% de la masse anhydre de la paroi cellulaire. Au total, le xylème contient près de 500 kg d'eau par m^3.

2.2 Problèmes mécaniques de l'arbre, facteurs d'influence principaux et régulations

2.2.1 Problèmes mécaniques de l'arbre. Le compartiment bois de l'arbre doit résoudre plusieurs grandes familles de problèmes mécanique : i) mécanique des fluides (circulation de la sève), ii) mécanique des structures (ancrage pour la partie souterraine, tenue de la structure face aux efforts pour la partie aérienne, iii) couplages fluide-structure en externe (arbre au vent) et en interne (risques d'embolie). Nous n'examinerons dans la suite que le cas de la partie aérienne et principalement les questions de mécanique des structures où le rôle du matériau est important. Compte tenu de l'élancement des axes, les problèmes principaux rencontrés concernent le flambement et la flexion avec ses aspects dynamiques (vibrations). La géométrie des axes et les propriétés mécaniques du

xylème dans la direction L sont les paramètres principaux permettant de comprendre le comportement mécanique usuel de l'arbre (en dehors des phénomènes de rupture).
Les efforts qui vont s'exercer sur l'arbre durant toute sa vie ont 3 origines principales : i) la gravité à travers le poids propre des éléments fabriqués au fur et à mesure de la construction de l'arbre (+ les surcharges temporaires dues à la pluie ou la neige), sa direction d'action est la verticale du lieu ; ii) le vent qui est caractérisé par sa vitesse et des fluctuations plus ou moins rapides, sa direction est horizontale, la force qu'il exerce dépend de la géometrie de l'arbre (prise au vent) ; iii) les forces générées par la maturation de chaque nouvelle couche de bois.
L'action de l'ensemble de ces forces dans la durée (de l'ordre du siècle) se traduit par des contraintes calculables en tout point de la structure et à chaque instant pourvu que la géométrie de l'arbre et le comportement (viscolélastique) du xylème soient connus. Si l'action de forces de courte durée sur une structure définie est un problème classique, le résultat de l'action de forces qui évoluent dans le temps (poids propre et forces de maturation) sur une structure dont la géométrie évolue en même temps est moins habituel. Les distributions de contrainte résultant de forces évolutives de longue durée sont appelées *contraintes de support* et *contraintes de maturation* respectivement.
Le principe de base du calcul incrémental de ces contraintes tient compte du principe : « l'histoire mécanique d'un nouvel élément de xylème ne commence qu'à partir de sa naissance» (Fournier 1989). Une couche de bois ne va commencer à supporter des contraintes qu'après sa rigidification.
La distribution finale dans une section droite de poutre est totalement atypique (Fournier 1989).
Pour un axe toujours vertical dans sa croissance, les contraintes de support sont négligeables et la distribution des contraintes de croissance standard donne une forte tension axiale en périphérie du cylindre et une très forte compression axiale à cœur (modèle de Kubler).
Pour un axe toujours oblique avec la même inclinaison, les containtes de support peuvent atteindre des valeurs très élevées au voisinage du cœur. Il faut que les forces générées par la maturation pendant l'intervalle de temps Δt produisent un couple résistant égal à l'incrément de couple induit par l'incrément de masse et de géométrie de l'axe (Fournier et al 2013).

2.2.2 Géométrie de l'arbre. Les paramètres pricipaux de la géométrie de l'arbre peuvent être obtenus par une descrition 3D assez fine de l'arbre (par Lidar terrestre par exemple) décrivant la distribution dans l'espace des axes (topologie), leur longueur et la géométrie de la section tout au long de l'axe. Cela permet de calculer des paramètres utiles en mécanique des structures comme la surface résistante au vent ou le facteur d'amortissement de structure lié à la ramification), les masses et les centres de gravité des poids propres agissant sur une section, les bras de levier des forces agissantes, l'inertie utile de la section face aux moments fléchissants. Tous ces paramètres évoluent au cours de la croissance du compartiment bois. La connaissnce de la géométrie et du modèle architectural permettent aussi d'avoir une estimation des forces induites par les feuilles ou les fruits.

2.2.3 Porosité et densité du xylème. La porosité varie de 15% à plus de 90% selon les espèces. L'infradensité désigne le rapport entre la masse de matière ligneuse anhydre et le volume du xylème à l'état vert (état de référence dans l'arbre). Pour l'ensemble des bois, cette infradensité varie de 0,1 à 1,2Kg/dm^3. Cet indicateur de la quantité de matière « mécaniquement active » dans le xylème est le premier paramètre déterminant les propriétés mécaniques. Dans la direction L le module d'élasticité (MOE) ou la résistance à la rupture (en compression ou en flexion) sont pratiquement proportionnels à l'infradensité. Le rapport entre le module (MOE) et la densité, appelé module spécifique, ne dépend plus de la densité.

2.2.4 Anisotropie du xylème. L'anisotropie est présente à toutes les échelles de description du compartiment bois : axes qui sont des poutres très élancées, fibres qui sont des cellules très élancées (tous deux avec des rapports d'élancement voisins de 100), couches des parois des fibres qui sont des composites à fibres. Pour l'axe comme pour la fibre un référenciel orthotrope cylindrique, avec la direction L alignée sur la direction de grand élancement, est utilisé. L'angle que fait la fibre avec la direction de l'axe (angle de fil) et l'angle que font les nanofibres de cellulose de la couche S2 dans la

paroi cellulaire avec l'axe de la fibre (angle des microfibrilles ou AMF) sont deux paramètres de structure pertinents pour prendre en compte l'anisotropie locale.
L'angle de fil est quasiment toujours très voisin de 0° sauf dans des cas particuliers comme : i) les arbres à *fil tors* où les fibres dessinent une spirale globale, ii) les espèces à *contrefil* où l'angle de fil dans le plan tangentiel-longitudinal oscille en permanence dans le temps entre couches de croissance successives (de la moelle vers l'écorce) entre un valeur négative (jusqu'à -25°) et une valeur positive de manière plus ou moins périodique, iii) les espèces à fil ondulé où l'angle du fil dans le plan tangentiel-longitudinal oscille de façon plus ou moins périodique dans une couche de croissance donnée quand on se déplace du bas vers le haut de l'axe. Dans tous les cas, une inclinaison périodique du fil diminue la module d'élasticité longitudinal macroscopique (à infradensité constante) généralement dans de faibles proportions (-10 à -20% maximum) et augmente très sensiblement la résistance à la propagation de fissure donc à l'éclatement par une fente à cœur.
L'AMF peut varier bien plus, de 0° à 50° et son augmentation, à infradensité constante, provoque une diminition du module jusqu'à une valeur 5 fois plus faible. La variation couramment observée de l'AMF au sein d'un même axe, de 10 à 30°, se traduit par une division par 2 du module et une multiplication par deux de la déformation maximale avant endommagement. Le module spécifique cité plus haut, est un indicateur simple de l'anisotropie globale du xylème. Dans la grande majorité des cas (fil droit) il signe les variations de l'AMF dans la paroi des fibres.

2.2.5 Chimie de la matrice dans la paroi des fibres. L'influence énorme des 3 facteurs cités jusqu'ici, dans l'ordre d'importance de leurs effets : géométrie, densité et anisotropie qui induisent des variations atteignant ou dépassant un facteur 5, rend difficile la perception et l'étude de l'influence de la chimie de la matrice. Le phénomène mécanique dépendant de la manière la plus évidente de la chimie des macromolécules pariétales est la déformation de maturation constatée en fin de polymérisation de la nouvelle couche de bois.
Des campagnes de mesure importantes ont montré que cette déformation de maturation ne dépend pas de l'infradensité du xylème, ni du plan ligneux, mais on trouve une influence sensible de l'AMF. Pour du xylème normal : xylème dont la chimie des polymères pariétaux varie peu dans le schéma de l'espèce, même si son infradensité et son AMF peuvent varier dans de fortes proportions (jusqu'à un facteur 3 pour l'ID et de 5 à 35° pour l'AMF), plus l'AMF est faible, plus grand est le retrait axial de maturation (jusqu'à 0,1% pour les petits AMF) qui génère des forces de traction en périphérie de l'axe. Quand l'AMF augmente (jusqu'à 35° par exemple pour du bois normal), la déformation de maturation diminue et peut même s'inverser en une très petite dilatation axiale.
Par contre il existe deux typologies de xylèmes dits de *réaction* qui possédent une composition chimique des polymères de la matrice qualitativement et quantitativement très différente de celle du bois normal. Le xyléme ou *bois de tension* uniquement présent chez les feuillus présente un retrait axial de maturation 4 à 5 fois plus élevé (jusqu'à 0,5%) que pour le bois normal à faible AMF (l'AMF du bois de tension est toujours très petit). Le xylème ou *bois de compression* toujours présent chez les conifères et chez de rares feuillus (buis par exemple) a un très fort AMF (30 à 50°), une plus forte densité que le bois normal et présente une dilatation axiale de maturation pouvant atteindre 0,2 à 0,3%). Dans un même arbre, des couches de bois normal avec de forts AMF (30 à 35°) n'atteigne jamis d'aussi hauts niveaux de dilatation. La maturation du bois de tension crée des forces de tension très élevées , celle du bois de compression crée des forces de compression.

2.2.6 Régulations. La vie d'un arbre dure très longtemps (un siècle jusqu'à quelques millénaires). Pendant cette période l'environnement de l'arbre peut se modifier (variations de climat, accès à l'eau et à la lumière perturbés, concurrence avec les voisins etc.) et l'arbre peut subir de nombreux aléas (déracinement partiel du au vent créant une forte inclinaison, mort ou casse du bout d'un axe pricipal, dégradation d'un méristème (mort d'un bourgeon terminal, blessure du cambium etc.).
Le génome de chaque arbre définit un schéma d'organisation (modèle architectural), des règles générales de genèse du xylème (plan ligneux) et de protection chimique du bois de cœur (signature chimique). Mais, à l'intérieur de ce schéma, toutes les modulations quantitatives sont possibles à n'importe quel lieu de croissance (bourgeon ou portion de cambium), pour adapter la suite de la

construction de l'arbre aux nouvelles conditions et résoudre les problèmes mécaniques en résultant (rééquilibrer la distribution des masses, restaurer la verticalité générale après inclinaison, créer une inclinaison pour fuir un ombrage trop important du voisinage, redresser une branche pour prendre la place de l'axe principal vertical après une casse de cime etc.).
La croissance en longueur et les ramifications vont être modulées pour réguler la position des centres de gravité des axes et maximiser l'accès local à la lumière.
La vitesse de division cambiale sera modulée pour réguler les inerties des sections et les bras de levier des forces de maturation.
La modulation de l'épaississement des parois, de l'angle des nanofibres de cellulose cristalline et de la composition chimique des polymères pariétaux est utilisée pour réguler respectivement : i) les masses, ii) les modules ainsi que la déformabilité du xylème et iii) les déformations de maturation et par conséquent les forces générées par la mise en place d'une nouvelle couche.
Cela permet un jeu très large de régulations qui ont été analysées dans les études de biomécanique de l'arbre, en montrant chaque fois la très grande pertinence au niveau global de l'arbre des régulations exercées au niveaux locaux lors de l'incrément de croissance du compartiment bois.

3. DECONSTRUCTION DE L'ARBRE

Le bois d'œuvre utilisé comme matériau consiste en pièces de xylème extraites d'un arbre pour des usages mécaniques. Ce peuvent être plusieurs axes (2 le plus souvent) connectés pour des usages spécifiques (construction navale, sculpture etc.), des portions d'axe comme les poteaux ou les piquets, des profilés divers comme les poutres, les planches ou des feuilles comme les placages.
Dans tous les cas il faut commencer par déconstruire l'arbre, comme lors de la récupération d'éléments de matériau dans la démolition d'un bâtiment.

3.1 Les opérations de première transformation

Dans l'industrie du bois le secteur récolte et première transformation regroupe les activités visant à passer du compartiment bois de l'arbre à des produits utilisables par toutes les industries utilisatrices de matériau ou de matière première à base de bois. L'arbre étant une structure, cette première transformation ne peut se faire que par des débits successifs utilisant différents modes d'usinage, ce qui explique l'importance de l'usinage comme thème d'étude et de recherche dans le secteur bois.
Dès la mort de l'arbre, après son débit, la matière constitutive du compartiment bois (bois lui-même et écorce), qui était très humide dans l'arbre, va tendre vers un équilibre hygroscopique, fonction des conditions ambiantes (température et humidité de l'air). Le xylème contient à la fois de l'eau libre dans les cavités cellulaires et de l'eau liée dans les parois cellulaires (bois vert). Arrivé à l'équilibre (bois sec à l'air), l'eau libre a été évacuée et il ne reste qu'une portion de l'eau liée dans les parois, 12% par exemple pour la condition standard (20°C et 65% HR) au lieu des 30% en moyenne dans le bois vert. Ce passage de 30% à 12% s'accompagne de déformations hygroscopiques fortement anisotropes et fonction de l'organisation et de la composition chimique du bois. Le séchage des pièces de bois récupérées lors des premiers débits est une opération qui suscite un volet important de recherches relevant de la mécanique que du génie des procédés (transferts de masse et de chaleur).
Ce n'est qu'après ces opérations de premier débit et de séchage que l'on peut dater la naissance du bois d'œuvre comme matériau de structure.
Avant toute chose il est bon de connaître l'état mécanique de la structure à déconstruire. Ce n'est jamais facile étant donné la superposition des contraintes de support (non concentionnelles) et des contraintes de croissance (qui dépendent beaucoup de l'histoire de l'arbre). La connaissance de cette histoire (sylviculture par exemple) peut fournir des indications, de même que la morphologie générale de l'arbre, les forts élancements étant corrélés par exemple à des niveaux plus élevés de contraintes de maturation, donc du niveau d'énergie élastique stockée dans l'arbre . En cas de besoin, une estimation in situ des contraintes résiduelles en périphérie ou une détection de secteurs de bois de réaction peut éclairer le débit (fortes différences entre deux côtés du tronc). Il faut savoir que l'énergie élastique accumulée dans un axe peut provoquer son éclatement lors d'un tronçonnage.

Les étapes successives des premiers débits sont: i) abattage de l'arbre, ii) tronçonnage en portions d'axes : grumes et billons, iii) sciage des rondins en poutres et planches ou déroulage/tranchage des rondins en feuiiles de bois (placages), iv) fragmentation de pièces de bois en copeaux et plaquettes, v) défibrage isolant les fibres ou tracheides du bois, vi) déconstruction de la paroi cellulaire permettant de récupérer des nanofibres de cellulose cristalline et des macromolécules. A partir de l'étape de fragmentation, il peut y avoir une récupération des extractibles utilisables par le secteur de la chimie fine (cosmétiques, pharmacie etc.), sans que cela empêche l'usage des copeaux ou fibres.

3.2 La cascade des usages du bois.

Le bois d'œuvre extrait de l'arbre est directement un matériau de structure utilisable au même titre que des profilés d'acier ou des feuilles de composite à fibre. C'est dans cet état qu'il est le plus ordonné. C'est aussi une source de matières premières (copeaux, fibres, nanofibres, polymères, molécules) pour de nombreux secteurs (panneaux structuraux ou isolants, papier-carton, matériaux composites ou nanostructurés, chimie fine). Enfin, du fait de sa composition (50% de carbone, 30% d'oxygène et 20% d'hydrogène), c'est toujours un bon combustible dès qu'il est sec et il peut être utilisé pour des besoins énergétiques à tous les stades de sa transformation. Les données statistiques globales sur la récolte en forêt identifient toujours 3 compartiments : bois d'œuvre, bois d'industrie et bois de feu selon l'usage direct présumé des rondins et billons récoltés. Les sous produits de la transformation en bois d'œuvre peuvent aller vers le bois d'industrie ou le bois de feu.
Au fur et à mesure de la déconstruction de l'arbre jusqu'à celle de la paroi cellulaire, il a augmentation du désordre et de l'entropie qui justifie une rationalisation des usages qualifiée par nos collègues européens de « cascade des usages du bois », à laquelle il faut associer les boucles de recyclage. Le principe est simple : rester dans un état ordonné le plus longtemps possible, par l'usage (utilisation de petites pièces de bois pour reconstituer des profilés divers par collage par exemple) et le recyclage (recyclage bien connu du papier ou réutilisation de chêne de tonnellerie pour l'ébénisterie par exemple), avant de passer à un état plus désordonné (défibrage de bois d'emballage pour la pâte à papier, récupération des liqueurs noires de papeterie pour produire des molécules par bioraffinerie etc.). Cela permet de séquestrer plus longtemps le carbone puisé dans l'atmosphère par les arbres, avant de le relarguer sous forme de CO^2 lors de l'utilisation énergétique. Celle-ci peut toujours se faire en fin de vie (il vaut mieux faire le plus tard possible dans le processus).
Cela signifie, qu'il faut d'abord privilégier l'usage direct comme matériau du bois, même s'il est possible de refabriquer des matériaux à partir des fibres, des nanofibres ou des polymères constitutifs. Il y aura toujours assez de matière première disponible comme sous produit ou en fin de recyclage du bois matériau. Mais pour cela il faut lever pas mal de verrous liés à la difficulté de la déconstruction de l'arbre et à la qualification des produits qui en découlent.

3.3 Qualification des profilés bois.

Un profilé est débité dans une portion d'axe (rondin) qu'il est possible de réfrencer dans l'arbre d'origine, à condition de garder cette information, en même temps que l'information de provenance géographique (point GPS et nature du peuplement). C'est une pratique de traçabilité souhaitable.
Le rondin lui-même est structuré selon les 3 axes d'orthotropie cylindrique : i) selon ***L*** : distribution de jonctions d'axes constituant des nœuds allant de la moelle vers l'écorce; ii) selon ***R*** : succession du noyau (à la fois bois juvénile et vieux duramen), du duramen externe et de l'aubier de la moelle vers l'écorce ; iii)) selon ***T*** : succession du bois le plus tendu (bois de tension éventuellement) vers le bois le moins tendu voire comprimé (bois de compression éventuellement), généralement de la face supérieure vers la face inférieure du rondin en place dans l'arbre. Il est toujours utile de conserver l'information quant à ces zonations du rondin dans le profilé, si c'est possible.
Un profilé peut contenir des zones avec des éléments de jonction (bois de jonction) et des zones plus ou moins longues (selon ***L***) sans traces de jonctions (bois net). La description des traces de jonction (nœuds) peut se faire, en 3D, par des outils d'imagerie de surface (trace des ramifications sur les

faces du profilé) ou traversante (imagerie en transmission de RX). La résistance mécanique en flexion d'un profilé contenant du bois de jonction est principalement déterminée par la présence des nœuds qui peut facilement la réduire d'un facteur 2 à 5 par rapport au bois net constituant l'essentiel du profilé.La prédiction de cette perte à partir de la caractérisation des nœuds est un axe important d'amélioration des machines de classement des poutres et planches.
Il est presque toujours possible d'obtenir des portions de profilé nettes de jonctions (bois net appelé bois sans défaut en l'absence de pourritures ou endommagements divers) de longueur plus ou moins importantes (du décimètre à quelques mètres). Ils peuvent être utilisés tels quels ou combinés par collage pour réaliser des profilés plus grands. Ils peuvent être homogènes (même zonation de base du rondin) ou hétérogènes (aubier / duramen, bois normal / bois de réaction dans la section). Les pièces hétérogènes peuvent être qualifiées selon différents modèles (loi des mélanges, principe du maillon faible, calcul mécanique explicite etc.) à partir de la connaissance des paties homogènes.
Les profilés homogènes correspondent à une zone dans le temps (années de croissances successives) et l'espace de l'arbre (position moyenne RTL) où la régulation de la croissance locale du xylème est restée constante (ce qui arrive assez souvent dans une vie d'arbre de plusieurs siècles). Pour les qualifier, il vaut mieux partir de la connaissance du processus de croissance : schéma de base piloté par le génome + modulations pour s'adapter à l'environnement. Les bois on une grande homogénéité de nature qui se traduit par des lois robustes reliant certains paramètres de description et les propriétés technologiques étudiées. Il est prévisible que ces lois soient paramétrées par le schéma génétique (qui prend en compte des éléments de description non mesurés ou inaccessibles).
Il est logique de retenir comme descripteurs principaux ceux qui traduisent directement les processus de modulation de la croissance : porosité (dont la densité), anisotropie (angle de fil et AMF), chimie des polymères pariétaux, extractibles et éléments minéraux hyperaccumulés, en y ajoutant un paramètre lié à la déconstruction : l'humidité du bois. Il existe des outils de caractérisation non destructive permettant de fournir de bons indicateurs sur ces descripteurs, en moyenne, dans un profilé. Il reste à construire les « lois robustes » discriminées par les éléments de traçabilité du profilé (espèce et provenance de l'arbre, position du profilé dans le rondin) qui permettraient de construire une fiche technique pertinente pour chaque profilé bois afin de l'utiliser dans le choix de matériaux pour une écoconception de produits contenant du bois matériau.

QUELQUES REFERENCES GENERALES ET FRANCOPHONES

Fournier M., Dlouhá J., Jaouen G. Almeras T., « Integrative biomechanics for tree ecology: beyond wood density and strength. Review paper », *Journal of Experimental Botany* (2013) doi:10.1093/jxb/ert279
Forest Products Laboratory. « Wood handbook—Wood as an engineering material ». *General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory*. (2010) 508 p.
Guitard D., "Mécanique du matériau bois et composites". *Cepadues (Ed.),* (1987) 238 p.
IAWA Committee, « IAWA list of microscopic features for hardwood identification.», *(E.A. Wheeler, P. Baas & P.E. Gasson, eds). IAWA Bull.* **n.s. 10**, (1989), pp. 219–332.
IAWA Committee, « IAWA list of microscopic features for softwood identification ». *(H.G. Richter, D. Grosser, I. Heinz & P.E. Gasson, eds). IAWA J.* **25**, (2004). Pp. 1–70
Hallé F., Oldeman R.A.A. « Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux », *Masson (ed.),* (1970), 178 p.
Raven P.H., Evert R.F., Eichorn S.E. « Biologie végétale » *De Boeck (ed.),* (2007), 733 p. + annexes
Stevanovic T., Perrin D, "Chimie du bois". *Presses polytechniques et universitaires romandes (Ed.),* (2007), 241 p.

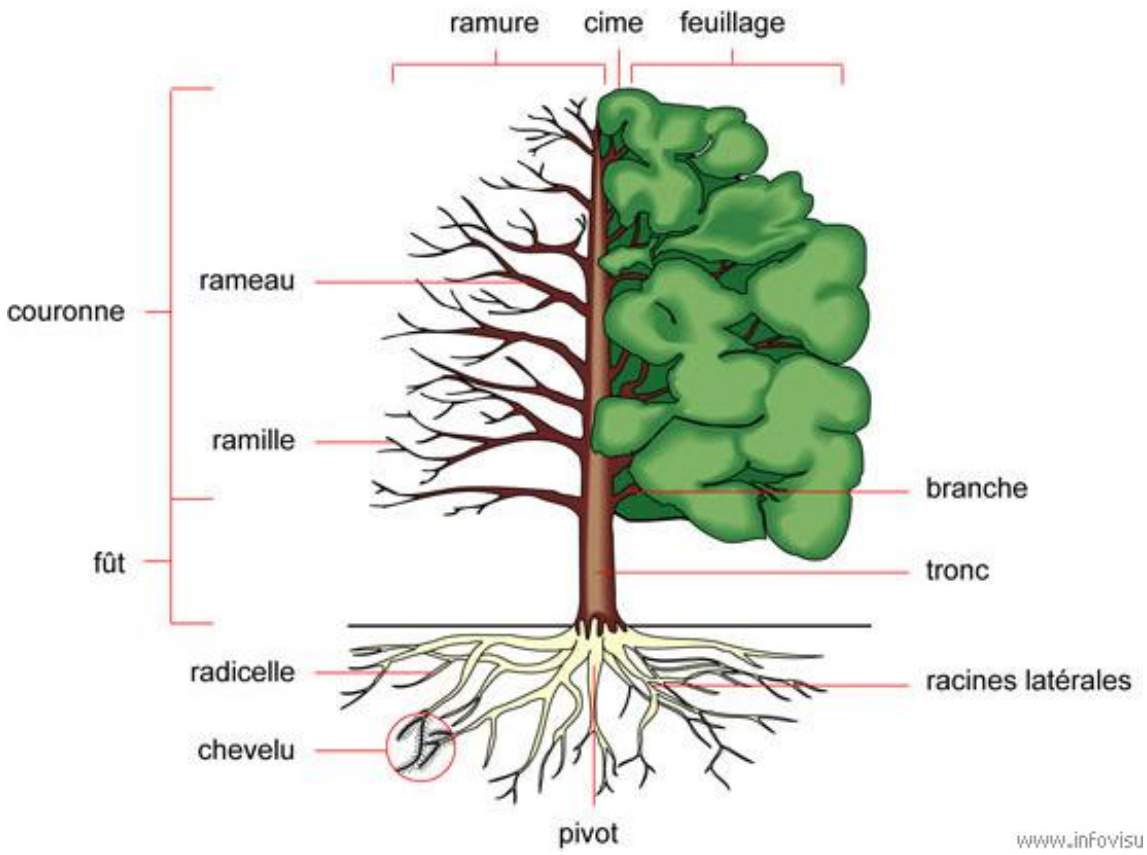

Fig. 1 Organisation générale d'un arbre

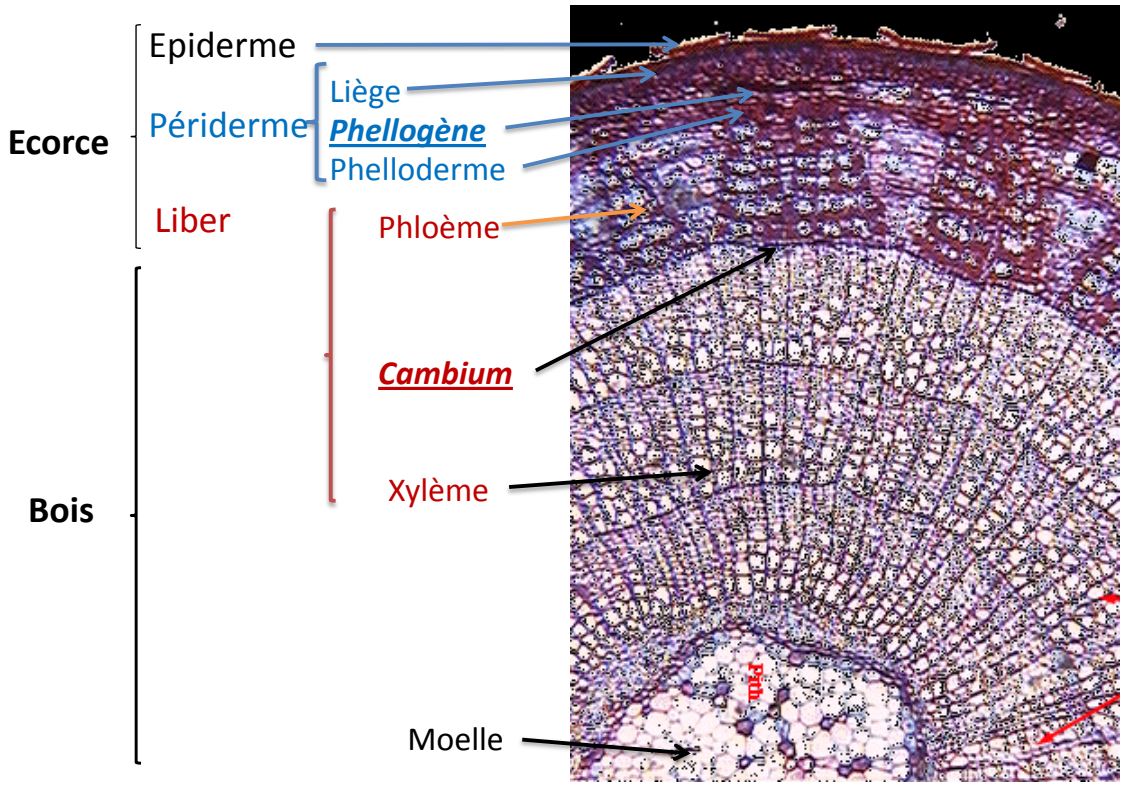

Fig. 2 Anatomie d'une section d'axe ligneux

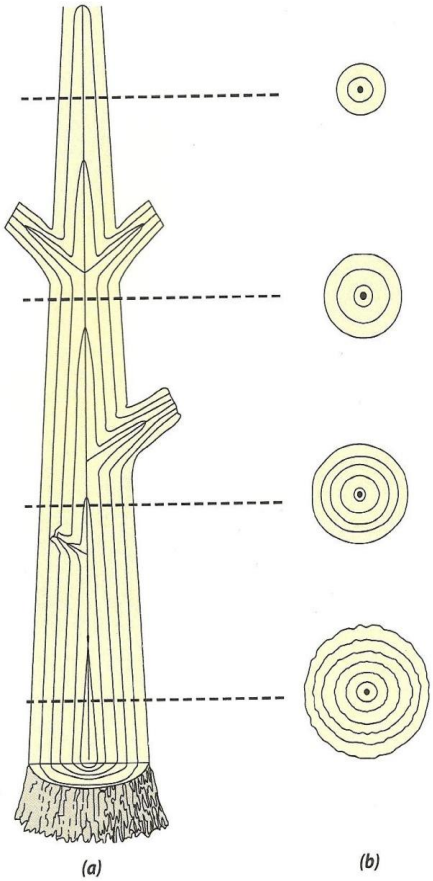

Fig. 3 Empilement de cernes et jonctions

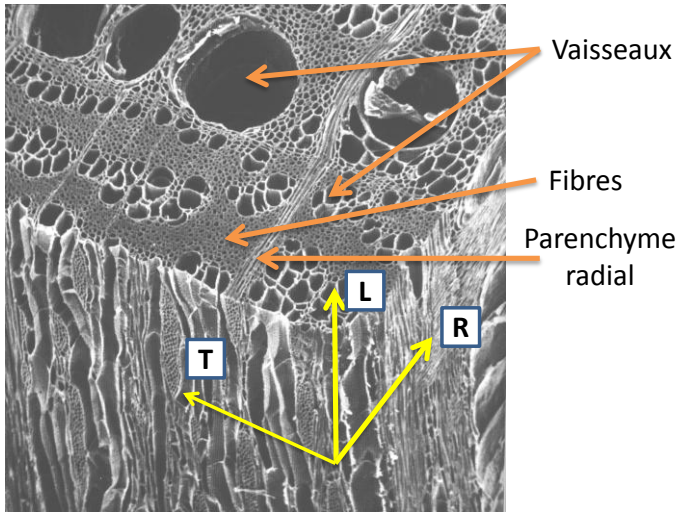

Fig.4 Anatomie du Xylème d'un feuillu

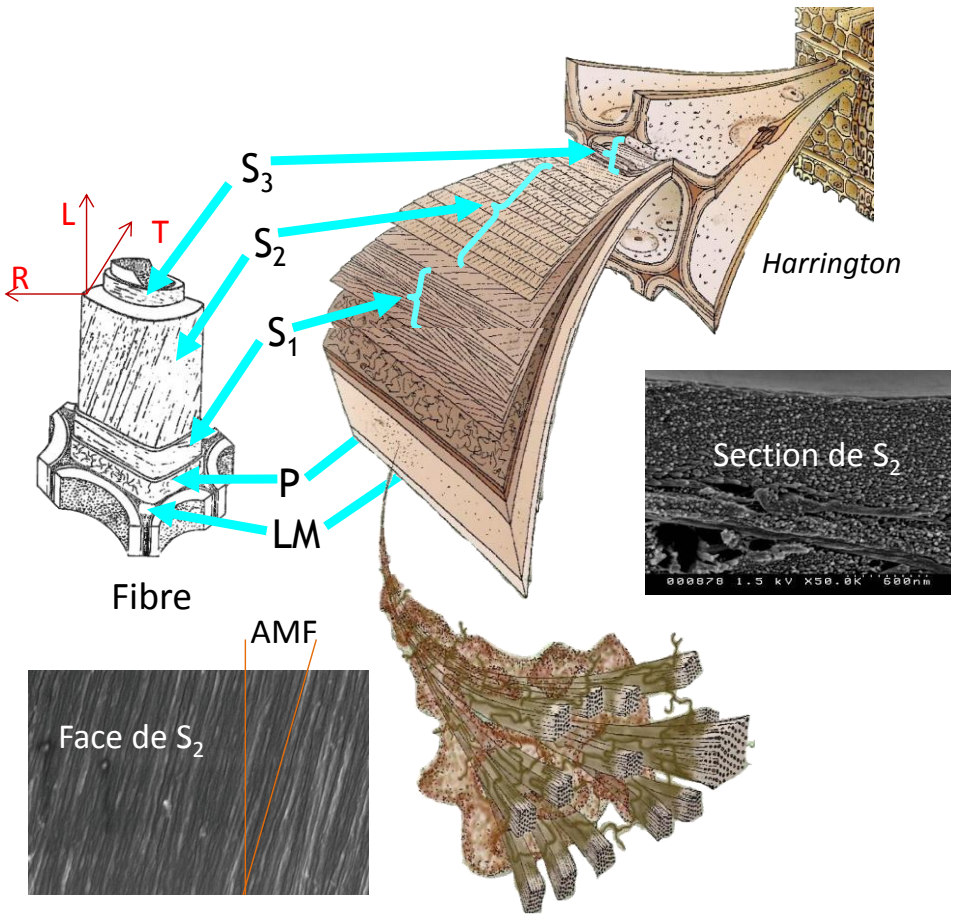

Fig. 5 Ultrastructure de la paroi d'une fibre