

Quelles fonctions du bois vivant dans l'arbre ?

Le bois est un terme de technologie qui désigne un matériau utilisé depuis l'aube de l'humanité. Le bois qui constitue une poutre ou une planche, a été débité dans le tronc coupé d'un arbre vivant. Avant d'être un matériau, le bois, est organisé au sein de l'arbre selon des structures complexes, et comporte des parties vivantes et des parties mortes. Quelles sont-elles et quels rôles fonctionnels ont-elles ?

Le bois vivant de l'arbre

Le bois, recouvert par l'écorce, est présent partout depuis les petites racines jusqu'aux derniers rameaux. On ne voit que lui dans un arbre défeuillé en hiver (fig.5 centre), c'est le compartiment ligneux de l'arbre. Il est décrit par les architectes (fiche 2.08) comme un ensemble d'axes ligneux emboîtés : tronc, branches, rameaux ...

La section transversale d'un axe ligneux, suffisamment âgé (fig.1), montre que le bois est constitué de deux zones concentriques : i) au cœur, le duramen (bois parfait du technologue), généralement plus foncé, qui ne comporte que des cellules mortes et ii) en périphérie, l'aubier, généralement plus clair, qui comporte encore des cellules vivantes. C'est le bois vivant de l'arbre qui constitue un manchon continu en périphérie du tronc et des branches. Par analogie avec le monde animal, on peut le considérer comme un organe concourant à la réalisation de plusieurs fonctions indispensables : i) construire l'arbre, ii) assurer sa tenue mécanique, iii) permettre la circulation de la sève et des informations depuis le chevelu racinaire jusqu'aux feuilles et iv) gérer des réserves d'eau et de nutriments.

Il est toujours constitué du même ensemble de cellules, interconnectées, dont la naissance, la vie et la mort sont programmées pour assurer les fonctions décrites : i) des cellules indifférenciées (analogues aux cellules souches animales) situées juste sous l'écorce (cambium) qui sont programmées pour se diviser; ii) des cellules de diamètre équivalent à leur longueur organisées en conduits pour la circulation des fluides (vaisseaux) après leur mort programmée qui est rapide (environ 2 semaines) ; iii) des cellules très allongées (rapport 100 entre longueur et diamètre) appelées fibres qui ont une fonction musculaire durant leur vie, puis une fonction de squelette après leur mort programmée qui est plus tardive (de 1 à 6 mois) ; iv) des petites cellules de diamètre équivalent à la longueur et contenant souvent des éléments comme de l'amidon (fig.2) ou des cristaux (les parenchymes), dont la mort programmée est très tardive (plusieurs années). Dans le cas des résineux il n'y a pas de vaisseaux et ce sont les cellules très allongées (trachéides similaires aux fibres) qui vont servir de conduits après leur mort cellulaire.

Compte tenu de la grande différence de durée de vie des cellules vivantes de l'aubier, il faut distinguer plusieurs zones successives, depuis l'extérieur: i) l'assise cambiale où 100% des cellules sont vivantes; ii) une zone musculaire où les fibres (ou les trachéides) et les parenchymes sont vivants ; iii) une zone conductrice où seules les cellules de parenchyme restent vivantes (fig.3).

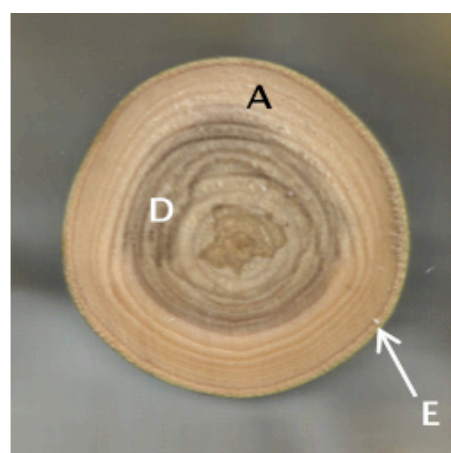


Figure 1. Section de tige de châtaignier : A : aubier - D : duramen - E : écorce

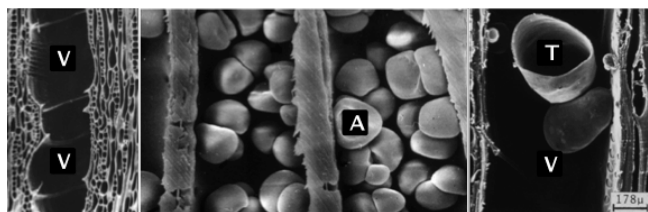


Figure 2. Coupes de vaisseaux et de parenchymes
à gauche: cellules de vaisseau (V) bordées de parenchymes,
au centre : grains d'amidon (A) dans les parenchymes,
à droite : fermeture d'un vaisseau par un thylle (T)

Photo B. Chanson

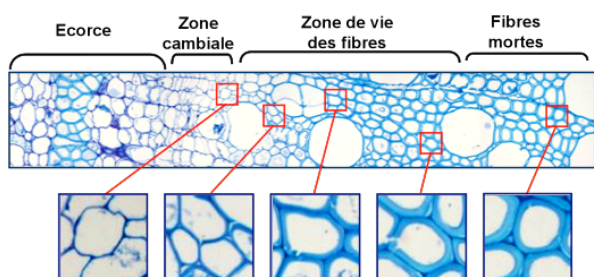


Figure 3. Détail de la zone de bois vivant sous l'écorce.

En bas, de gauche à droite : fibre en fin d'expansion ; paroi primaire en place ; début de dépôt de paroi secondaire ; fin de dépôt de paroi secondaire ; fibre morte.

Photo B. Clair

L'assise cambiale : bâtisseur de la structure

La construction du compartiment ligneux de l'arbre relève d'un processus de fabrication additive, analogue à l'action d'une imprimante 3D qui ajoute de la matière en permanence selon un double processus : i) l'ajout d'axes ligneux et leur allongement par l'extrémité (croissance primaire), qui est réalisé par les bourgeons, ii) l'épaississement de ces axes par la périphérie (croissance secondaire) qui est réalisé par le cambium. On appelle croissance ce processus de fabrication. C'est l'addition de deux activités cellulaires successives : la *division cellulaire* qui ajoute de nouvelles cellules et la *différenciation* en fibres (ou trachéides), cellules de vaisseau et cellules de parenchyme, qui s'accompagne d'une forte expansion cellulaire.

La fin de l'activité cambiale signe la naissance des cellules du bois vivant et définit la nouvelle géométrie (longueur et diamètre) du compartiment ligneux. Le processus de fabrication additive est régulé à la fois par le génome et par les conditions de vie de l'arbre au moment de l'addition : nombre de divisions, rapport entre croissance primaire et croissance secondaire, pourcentage et dimension des cellules. Cela se traduit par des paramètres géométriques déterminants, i) en mécanique des structures : élancement (rapport longueur sur diamètre) et inertie (proportionnelle à la puissance 4 du diamètre) des poutres et ii) en hydraulique de conduction de la sève (nombre et diamètre des conduits).

Les fibres : muscles puis squelette de l'arbre

A la fin du processus de croissance, les fibres (ou les trachéides) vivantes ont une paroi primaire comme toute cellule végétale. Pendant leur vie, qui peut durer de 1 à 6 mois, une seconde paroi va se déposer contre la paroi primaire. L'épaisseur de cette paroi secondaire dépend de la durée de vie de la fibre. Globalement, cette paroi secondaire est un composite à fibres orientées constitué de nanofibres cristallines de cellulose enrobées par une matrice de lignine et d'hémicelluloses (voir fiches 7-08, 7-11 et 7-14). Ce dépôt et sa maturation (polymérisation) vont permettre à la fibre vivante de générer des forces, au même titre que des fibres musculaires animales. Lors de la mort cellulaire programmée des fibres, leur adhésion au squelette, que constituent les fibres déjà mortes, maintient l'état de tension (ou de compression) atteint par la fibre en fin de vie. Ce mécanisme très lent comparé aux muscles animaux permet de générer des forces très importantes jusqu'à plus de 5kN (500 Kg_{force}) pour une section de bois vivant de 1 cm².

Chaque fibre a la capacité d'ajuster la force «musculaire» qu'elle va exercer par 3 mécanismes principaux : i) la durée de déposition de la paroi secondaire qui se traduit par une épaisseur de plus en plus grande des couches mécaniquement actives ; ii) l'organisation des nanofibres de cellulose : pourcentage de cellulose cristalline, agrégation et orientation par rapport à l'axe de la fibre (angle des microfibrilles) ; iii) la composition chimique des polymères structurels que sont la lignine et les hémicelluloses.

2.13

Il est usuel de séparer les « super muscles » qui créent des efforts nettement en dehors des valeurs courantes, soit des forces de compression (bois de compression) soit des forces de traction extrêmes (bois de tension) et les « muscles normaux » (bois normal) qui créent des forces de traction plus modérées. Les « super muscles » sont utilisés dans les situations nécessitant des forces extrêmes (branches quasi horizontales ou restauration de la verticalité pour un arbre incliné accidentellement). Le bois normal a une composition chimique proche de la médiane pour l'espèce mais peut avoir des variations importantes de densité et d'angle des microfibrilles (de 5° à 40°) environ. Le bois de compression a une composition chimique très décalée par rapport aux bois normaux (plus de lignine notamment) et un angle des microfibrilles toujours très élevé (30 à 50°). Le bois de tension a une organisation de la cellulose et une composition chimique très décalée par rapport aux bois normaux (moins de lignine notamment) et un angle des microfibrilles toujours très faible (fig. 4).

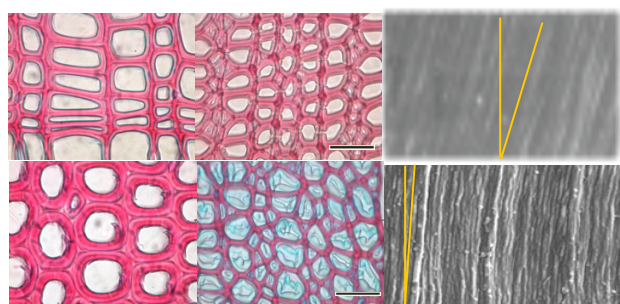


Figure 4. Coupes microscopiques de bois -
à gauche : pin maritime - haut : bois normal ; bas : bois de compression
au centre : wapa (arbre de Guyane) - haut: bois normal ; bas : bois de tension
à droite : microfibrilles de wapa - haut : bois normal ; bas: bois de tension
La cellulose se colore de bleu et la lignine de rouge.
L'inclinaison des nanofibres de cellulose est l'angle des microfibrilles
Photo J. Ruelle

Quel est l'intérêt pour le bois vivant de créer des forces dans l'arbre ?

Un premier enjeu est d'augmenter la résistance des poutres que sont les axes ligneux. En cas de flexion due au vent, un côté de la poutre doit résister à la traction, l'autre à la compression. Le bois est deux fois plus résistant en traction qu'en compression dans la direction de l'axe. Il est donc intéressant d'utiliser une précontrainte en traction sur tout le pourtour de l'arbre, comme on utilise une précontrainte en compression dans le béton armé (il résiste beaucoup moins bien en traction). C'est ce que l'on mesure sur des troncs d'arbres droits bien équilibrés. Le risque étant plus grand pour les arbres élancés, on constate que la force de traction créée y est plus grande que chez les arbres trapus (fig.5)

Le deuxième enjeu est le contrôle de la posture : i) comment pousser droit et vertical dans le champ de la pesanteur et ii) comment éviter qu'une branche horizontale ne s'affaisse de plus en plus pendant sa croissance. Dans le monde animal, ce contrôle de posture se fait par le jeu de muscles antagonistes, les uns sont tendus quand les autres sont relâchés.

Le même mécanisme est utilisé en modulant les forces créées de part et d'autre d'un axe ligneux pour restaurer la verticalité ou maintenir une croissance inclinée. En créant des forces dissymétriques entre la face supérieure et la face inférieure d'une tige ou d'une branche inclinée, le bois vivant génère un moment fléchissant qui peut s'opposer à l'affaissement inévitable de l'axe ligneux ou modifier progressivement l'inclinaison pour le redresser (par exemple après un accident qui a incliné le tronc, fig. 5). Cela a été parfaitement démontré du point de vue théorique et expérimental sur des arbres vivants.



Figure 5. Forces de traction dans l'arbre -
à gauche : arbre élancé,
au centre : arbre trapu,
à droite : arbre en redressement.
La longueur de la double flèche indique la force de traction

Les parenchymes acteurs de la circulation des fluides, des nutriments et des informations dans l'arbre

La mort cellulaire des cellules de fibre, trachéide et vaisseau leur permet de jouer un rôle passif de squelette (résistance aux efforts extérieurs) et de conduits (montée de la sève). Mais elles restent connectées au reste de l'arbre par les cellules de parenchymes constituant un réseau axial et radial.

L'activité de conduction de la sève se fait en miroir, de part et d'autre du cambium, entre le xylème vivant (bois vivant) pour la sève montante et le phloème vivant (qui est une partie de l'écorce vivante) pour la sève descendante. Les cellules de parenchyme rassemblées dans les rayons médullaires qui traversent la zone cambiale, assurent la régulation entre les deux flux. Les cellules de parenchyme vont aussi assurer une fonction de stockage de nutriments (amidon ...), de cristaux (silice, oxalate de calcium), de résines ou d'huiles essentielles mobilisables très rapidement.

Enfin, le réseau des parenchymes associé au réseau hydraulique et au cambium est mobilisé pour la transmission des informations entre compartiments de l'arbre par différents vecteurs comme les signaux électriques, mécaniques ou chimiques. La mort programmée des cellules de parenchyme, s'appelle la duraminisation et s'accompagne à la fois de blocages des conduits et de synthèse d'un cocktail de molécules bioactives (une centaine de molécules appelées extractibles, signature de l'espèce) qui vont imprégner le bois de cœur qui est mort.

Qui s'occupe de la santé du bois ?

On aime bien comparer la sève et le sang, mais il n'y a pas de globules blancs dans le bois vivant. Ce sont les parenchymes qui sont les médecins du bois et leur outil c'est la chimie. En cas de pépin, les cellules de parenchyme voisines de la zone d'attaque par un micro-organisme ou un insecte, vont synthétiser et diffuser un cocktail de petites molécules bioactives (comme lors de la duraminisation) et bloquer les vaisseaux encore actifs dans une zone bien définie. Cela se fait par la mort programmée de ces cellules de parenchyme, créant une zone nécrosée autour de l'attaque.

Pour en savoir plus

Alméras T. & Fournier M. (2009) Biomechanical design and long-term stability of trees: Morphological and wood traits involved in the balance between weight increase and the gravitropic reaction. *Journal of Theoretical Biology* 256 : 370–381

Cuny H. (2013) Dynamique intra-annuelle de la formation du bois de trois espèces de conifères (Sapin pectiné, Epicéa commun, Pin sylvestre) dans les Vosges. Thèse de doctorat, Sciences forestières et sciences du bois, Université de Lorraine

Bruno Moulia B. & Fournier M. (2009) The power and control of gravitropic movements in plants: a biomechanical and systems biology view. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 60: 461–486

Trouy M.C. (2015) Anatomie du bois – Formation, fonctions et identification, Éditions QUAE, 151 pages.

Ce qu'il faut retenir

- Le bois matériau est extrait des parties ligneuses des arbres : tronc, branches et racines. Il est mort, mais dans l'arbre vivant il y a aussi du bois vivant
- Le bois vivant comprend des cellules «souches», des conduits pour la sève, des fibres et des parenchymes
- Par l'activité des cellules souches, le bois construit la structure arborée comme une imprimante 3D.
- Les fibres vivantes produisent des forces de régulation de la posture des arbres au même titre que des fibres musculaires.
- Les vaisseaux qui conduisent la sève sont des cellules mortes mais les parenchymes du bois régulent la conduction de la sève.
- Les parenchymes protègent le bois par la chimie.
- Le bois vivant s'adapte aux conditions environnementales qui existent lors de sa vie, entre naissance et mort programmée.
- Le bois matériau conserve la trace de toutes les réponses locales du bois vivant à ses fonctions dans l'arbre.