

QUELS APPORTS DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES À LA RESTAURATION DE NOTRE-DAME DE PARIS ?

Les techniques de mise en œuvre du bois dans les charpentes de cathédrales : pertinence et innovations.

Bernard Thibaut, directeur de recherche émérite, CNRS, LGMC, université de Montpellier

Une renaissance du bois grâce aux avancées scientifiques du 21^{ème} siècle

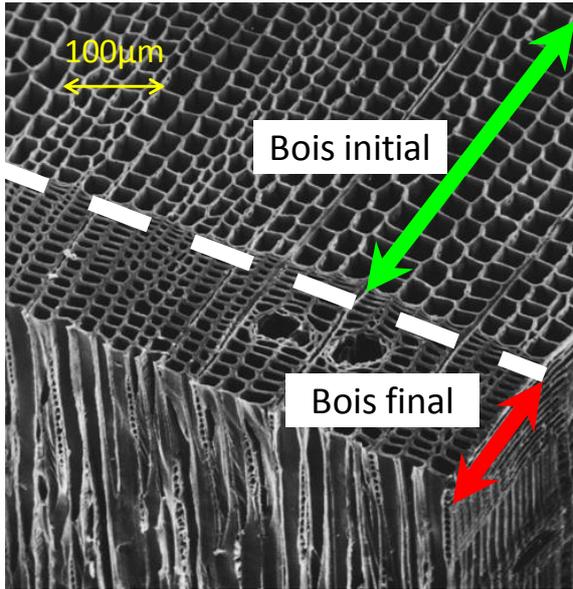
Un matériau sophistiqué résolument moderne

Le bois est une innovation majeure du mode végétal qui remonte à 300 millions d'années et c'est aujourd'hui la plus grande biomasse terrestre. Décliné ensuite en de nombreuses innovations mineures, comme le chêne apparu il y a 20 millions d'années, il est le matériau qui permet de construire des architectures audacieuses comme les arbres résistant des siècles aux efforts de la gravité et du vent.

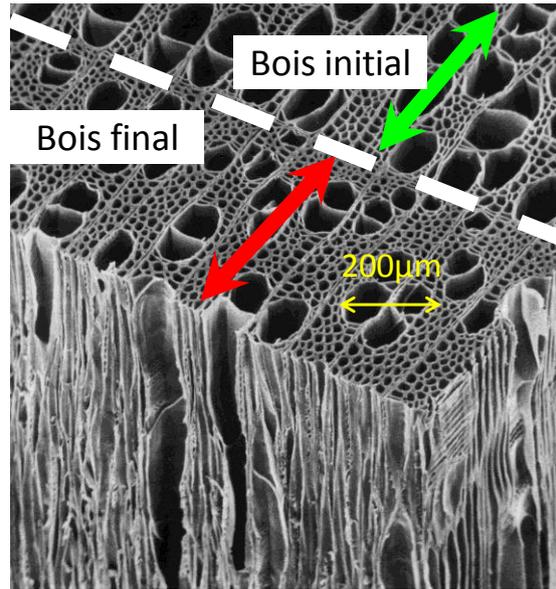
Grâce aux outils modernes de caractérisation (microscopie électronique et à force atomique, diffraction X ...) et de modélisation, les scientifiques ont montré le caractère étonnamment moderne de ce matériau ultra sophistiqué :

- C'est un nid d'abeille, à l'échelle du micromètre, dont la direction principale est le fil du bois
- Le matériau des parois des cellules du nid d'abeille est un composite à fibres à l'échelle du nanomètre
- La matrice du composite à fibre est un alliage de polymères carbonés plus ou moins hydrophiles
- Cette matrice est dopée par un cocktail de molécules actives (plus de 90 pour le chêne) qui régule les interactions avec les microorganismes et détermine les propriétés sensorielles du bois
- La fabrication de l'arbre est un processus analogue à l'impression 3D qui permet d'ajuster la construction aux conditions de chargement en optimisant partout la direction du fil du bois

Au total, c'est le plus léger des matériaux utilisables pour des poutres en flexion (double atout du nid d'abeille et du composite à fibre) et le plus résistant à la fatigue mécanique (cahier des charges pour la tenue au vent des arbres pendant des siècles).

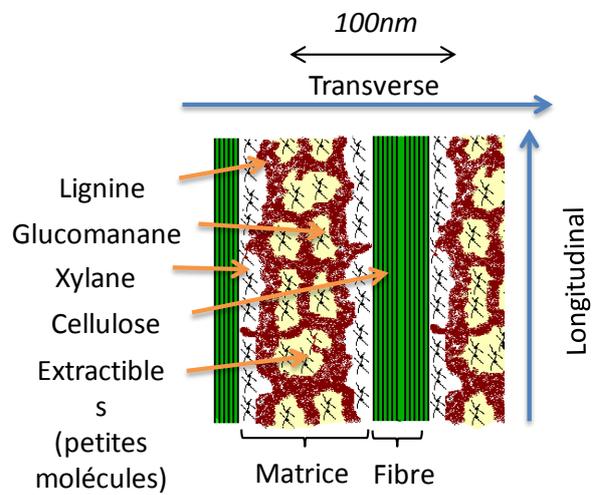
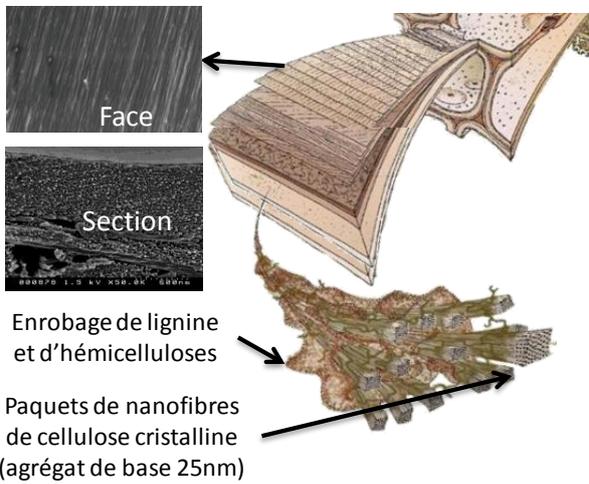


Bois de résineux



Bois de feuillu

Structure de type nid d'abeille pour un bois résineux et un bois feuillu



Structure et composition chimique du composite à fibre constituant la paroi du nid d'abeille



Variations de couleur dues aux extractibles de bois de la forêt française

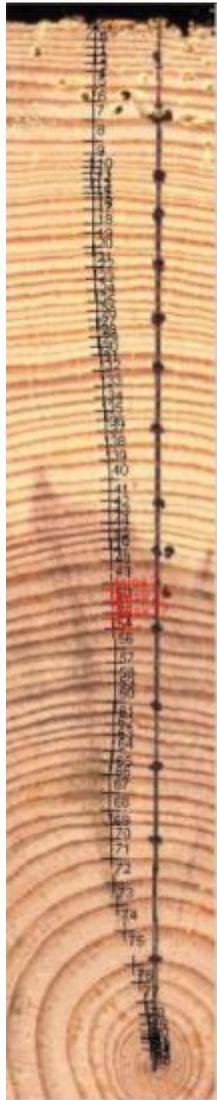
Des innovations oubliées des charpentiers du Moyen Age

Le bois est utilisé comme matériau de construction depuis l'arrivée d'Homo sapiens et de nombreuses innovations sont apparues dans la période historique depuis le néolithique (arc, barrique, luth, roue ...). Le Moyen Age qui est l'âge des cathédrales a vu le développement d'un âge d'or de la charpente en bois, notamment en chêne pour la France. Les savoir-faire résultant de ces innovations sont transmis aux charpentiers par la voie de l'apprentissage, mais ils sont aussi consignés dans les charpentes elles mêmes, le bois étant un véritable livre d'histoire qu'il faut savoir déchiffrer.

La dendrochronologie est un outil récent, en plein développement grâce aux apports de l'imagerie par tomographie de rayons X, des programmes de comparaison de spectres et des travaux des historiens, forestiers et archéologues pour obtenir une référence fiable pour le chêne sur les derniers 2000 ans. Il est désormais possible de dater à l'année près l'âge des arbres coupés pour les poutres mais aussi la date de leur abattage.

En croisant ces sources historiques venant du bois et celles provenant des documents écrits, les historiens ont percé les mystères des charpentes médiévales. Les charpentiers sélectionnaient surtout des arbres élancés et d'assez petit diamètre (25 – 35 cm) qui étaient plutôt jeunes (moins de 100 ans). Ils utilisaient les troncs entiers équarris pour garder la résistance de l'arbre et surtout ils les mettaient en place dans la charpente rapidement après l'abattage qui se faisait en hiver. Les pièces de charpente n'étaient donc pas séchées avant l'utilisation.

L'expérience a démontré, dans les nombreuses charpentes de monuments historiques, que les bois ont parfaitement résisté pendant de nombreux siècles (800 pour Notre Dame de Paris). C'est donc une technique fiable. Les données qui pourront être obtenus par les scientifiques sur les restes de cette charpente digitalisée, sont une occasion unique d'aller plus loin dans cette compréhension afin d'éclairer d'autres chantiers.



Charpente de Notre
Dame de Paris



Franchissement de
rivière en Guyane

Dendrochronologie de bois de pin à gauche, utilisation de bois équarris à droite

Des solutions actuelles dans la continuité des acquis

Des chênes du 21^{ème} siècle à disposition dans la forêt française

Il faut moins de 2000 chênes de faible diamètre pour la charpente de Notre Dame de Paris. Dans cette catégorie de diamètres (25 à 35 cm) l'Inventaire forestier national répertorie environ 200 millions d'arbres en France hexagonale. Il suffit donc de trier un sur cent mille arbres dans nos forêts pour trouver les futures poutres.

Bien entendu toutes les forêts ne seront pas parcourues à pied par le charpentier comme au Moyen Age. Les très nombreuses données existantes et la mobilisation acquise des forestiers permettront d'identifier rapidement des zones contenant des chênes avec l'élancement recherché.

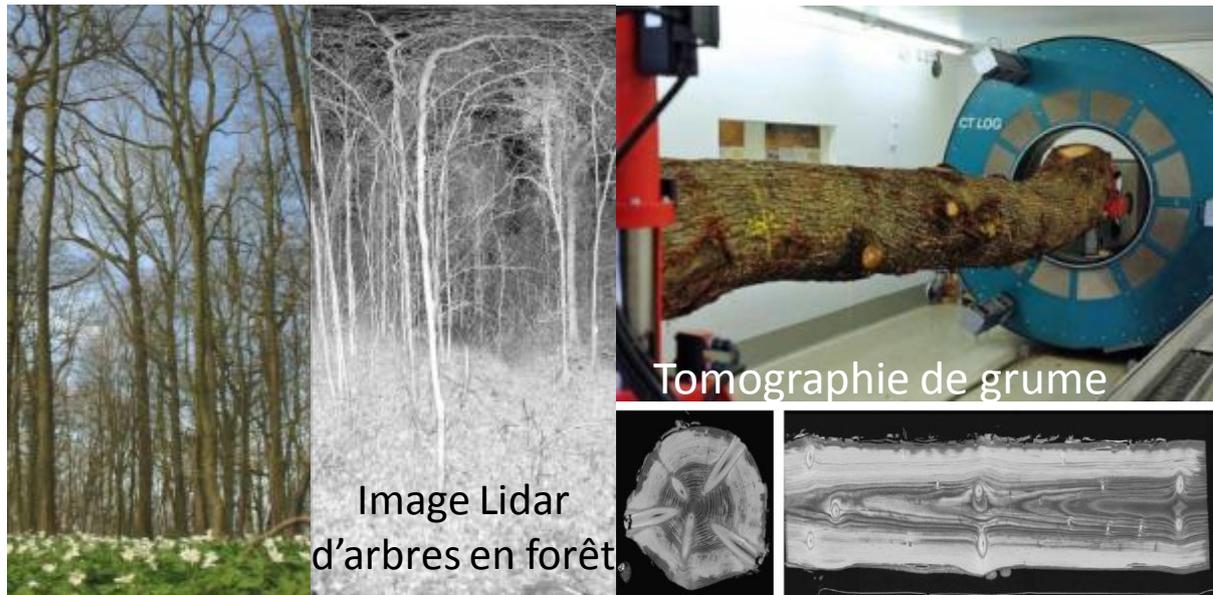
Grâce à la digitalisation 3D de la charpente, réalisée avant l'incendie, on a un descriptif des pièces recherchées. Avec les outils modernes tels que le Lidar terrestre, il est possible de réaliser rapidement une numérisation 3D des arbres candidats afin de vérifier avant abattage leur concordance, a priori, avec la demande.

En réalisant un carottage à la base de ces nominés, il sera possible de connaître l'épaisseur d'aubier, la largeur des cernes et la densité du bois (par micro-densitométrie). En utilisant la spectrométrie proche infrarouge et les bases de données des tonneliers, on pourra connaître la richesse en tannins de ces chênes. On obtiendra ainsi une bonne prédiction de leur résistance mécanique et de leur

résistance aux champignons et insectes, afin d'aider la sélection finale avant abattage et préparation de la longue grume qui donnera la poutre.

Avant d'équarrir cette poutre, en respectant le fil du bois, un passage en tomographie de rayons X permettra de déceler d'éventuelles pourritures cachées. Un essai non destructif de flexion de cette grume donnera une valeur précise de sa rigidité. Cela permettra d'éliminer les quelques grumes hors gabarit en termes de défauts internes et de rigidité.

Avec cette caractérisation des poutres mises en œuvre et le plan détaillé de construction issu de la numérisation 3D pré-incendie, il sera possible d'estimer, par simulation numérique, le facteur de sécurité de la charpente explicatif de la très longue durée de vie constatée.



Des techniques modernes pour mesurer précisément les bois sur pied ou en grumes

Des compagnons charpentiers du 21^{ème} siècle passeurs des savoir-faire du Moyen -Age

Le métier de charpentier est un des métiers d'art reconnu et préservé en France. Chaque année des « Meilleurs ouvriers de France » prouvent leur acquisition des savoir-faire les plus performants. Un maître charpentier a une formation aussi longue et une compétence aussi forte qu'un ingénieur de fabrication chez Airbus.

Beaucoup d'entre eux travaillent dans la rénovation des monuments anciens et ont su réaliser le mariage entre savoirs anciens de base et innovations de chantiers récentes (guidage et mesure laser, outillage électroportatif, vérins de levage ...). Une équipe bien organisée d'une cinquantaine de compagnons, sous la houlette d'un architecte des monuments historiques, peut monter la charpente en un à deux ans maximum, une fois que les grumes sont livrées sur le chantier.

Pourquoi il peut être intéressant de refaire la charpente en chênes du 21^{ème} siècle pour le prochain millénaire

C'est une solution rapide (moins de deux ans), peu onéreuse et qui offre une garantie de résistance supérieure à cinq siècles.

Parmi les solutions fiables, permettant de refaire la charpente, le chêne possède un atout environnemental évident : une tonne de chêne utilisée dans la charpente c'est 1,8 tonne de CO² récupérée dans l'atmosphère et stockée pendant des siècles. C'est aussi le matériau et la technique qui consomment le moins d'énergie fossile pour la mise en œuvre. Cela inscrirait la cathédrale renouvelée dans l'objectif parisien de la neutralité carbone à l'horizon de 2050.

La charpente médiévale de Notre Dame, ce n'est pas qu'un hommage aux chênes français, c'est le résultat de milliers d'années d'innovations dans le mariage entre la forêt française et le peuple des charpentiers. L'émotion de toute la communauté des gens du bois est telle que, même si ces charpentiers experts ne sont plus très nombreux, ils sauront se libérer le temps du chantier qui devrait être une école pour autant d'apprentis sous les regards des parisiens et des touristes.

Mieux protéger les charpentes de notre patrimoine

La très grande majorité des charpentes monumentales de notre patrimoine sont faites en chêne, avec des pièces de forte section. Le chêne sec à l'air de ces charpentes est un bon combustible, c'est-à-dire qu'il peut brûler, mais il ne brûle pas si facilement comme l'attestent les très longues durées de vie des charpentes.

Pour amorcer la combustion autonome d'une poutre en chêne il faut apporter une grande quantité de chaleur, à des températures supérieures à 280°C, pendant un temps suffisamment long (10 minutes environ). Le bois qui a commencé sa combustion va ensuite apporter la quantité de chaleur nécessaire pour enflammer progressivement toute la charpente.

Dans les épisodes récents de feux de charpentes monumentales, le démarrage de l'incendie est quasiment toujours associé à des travaux dans le voisinage de la charpente. Cela signifie que ces travaux sont capables d'apporter localement de grandes quantités de chaleur par accumulation de combustible facile à enflammer (y compris du bois en petite sections) et d'amorces de feu (dont les étincelles électriques). La répétition des accidents liés aux travaux prouve que les règles de sécurité ne sont pas adaptées aux situations des monuments. Il ne faut pas qu'une grande quantité de chaleur puisse se développer au voisinage immédiat des pièces de charpente sans être détectée.

Ce problème ressemble beaucoup aux départs de feux de forêt. Des progrès considérables ont été faits quant à la physique de ces feux et il faut en tirer parti pour les monuments. En utilisant ces connaissances et les développements très rapides des moyens de surveillance (caméras thermiques, intelligence artificielle) et d'intervention précoce (robots extincteurs) appuyant les services de lutte contre l'incendie, il est possible d'établir de nouvelles règles de sécurité mieux adaptées et appliquées dans l'avenir.

Les accidents ont aussi des facteurs humains qui doivent être pris en compte dans les actes de prévention. Une formation au problème du feu de charpente doit être mise en place et suivie par tous les acteurs de préservation et de restauration des monuments. Une mobilisation citoyenne du type « Comité citoyen des charpentes monumentales » similaire aux « Comités communaux feux de forêt » mis en place en région méditerranéenne pourrait être envisagée.

Quelques références

Lebourgeois F, Merian P (2012) Principes et méthodes de la dendrochronologie. Nancy, UMR INRA-ENGREF 1092

Durost S, Rossignol B, Lambert G-N, Bernard V (2008) Climat, Guerre des Gaules et dendrochronologie du chêne (*Quercus sp.*) du 1er siècle av. J.-C. ArcheoSciences, revue d'archéométrie, **32** : 31-50

Epaud F (2017) La charpente de la cathédrale de Bourges. De la forêt au chantier. PUFR, Coll. Perspectives historiques », Tours.

Trouy M-C (2015) Anatomie du bois. Editions Quae

Stevanovic T, Perrin D (2009) Chimie du bois. Presses polytechniques et universitaires romandes