



HAL
open science

Des axes de recherche porteurs d'espoirs pour demain

Gérard Nepveu, Patrick Perre

► **To cite this version:**

Gérard Nepveu, Patrick Perre. Des axes de recherche porteurs d'espoirs pour demain : L'OPTIMISATION DE L'UTILISATION DE LA RESSOURCE FORESTIÈRE EN PLACE. LA PRÉPARATION DE LA RESSOURCE DU FUTUR. Revue forestière française, 2004, 56 (sp), pp.194-210. 10.4267/2042/5141 . hal-03449401

HAL Id: hal-03449401

<https://hal.science/hal-03449401>

Submitted on 25 Nov 2021

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.

DES AXES DE RECHERCHE PORTEURS D'ESPOIR POUR DEMAIN

GÉRARD NEPVEU - PATRICK PERRÉ

L'article (p. 175) sur les grandes évolutions des matériaux bois et à base de bois mettait en évidence la largeur du spectre des domaines de recherche susceptibles de faire avancer l'utilisation du bois.

Parmi ces nombreux domaines, ceux relatifs à la connaissance du matériau et de son comportement lors des premiers processus de transformation sont fondamentaux.

Dans une première partie, cet article fait le point sur le niveau et les perspectives des recherches permettant de connaître, de façon moderne, certaines caractéristiques de la ressource forestière sur pied actuelle et de la ressource future en vue d'en optimiser et d'en développer l'utilisation.

Dans une seconde partie, il montre les progrès rendus possibles grâce à l'approche déterministe et les possibilités qu'elle offre pour connaître et prédire à la fois plusieurs caractéristiques du matériau et son comportement lors de certains processus de transformation.



Photo M. PITTSCH - INRA

L'OPTIMISATION DE L'UTILISATION DE LA RESSOURCE FORESTIÈRE EN PLACE. LA PRÉPARATION DE LA RESSOURCE DU FUTUR

GÉRARD NEPVEU

Quelles sont les recherches à poursuivre ou à lancer pour promouvoir une meilleure utilisation de la ressource forestière actuellement disponible, mais aussi de celle mobilisable dans un futur plus ou moins proche ?

Telle est la question qui préoccupe les industriels du bois et les forestiers qui, à des degrés divers, disposent de moyens d'action sur la qualité des bois en orientant leurs approvisionnements (cas des industriels) ou en jouant sur la sylviculture entendue au sens large (cas des forestiers). Face à ce très vaste sujet, concentrons-nous sur les priorités qui nous semblent majeures.

L'OPTIMISATION DE L'UTILISATION DE LA RESSOURCE EN PLACE

Notre pays a la chance de disposer d'une ressource en bois abondante, diversifiée, relativement bien gérée et bien inventoriée à tout le moins au niveau quantitatif et à l'échelle de bassins d'approvisionnement assez étendus. Par ailleurs, le fait d'utiliser cette ressource pour produire des biens rencontre de plus en plus la faveur du public.

Cette ressource est cependant très loin d'être utilisée à plein. Les raisons structurelles de cette sous-utilisation et les moyens d'y remédier ont été exposés dans d'innombrables rapports sans que le paysage n'ait vraiment changé depuis de façon radicale.

Limitons-nous ici à inventorier les contributions de la recherche qui nous apparaissent propres à lever certaines des difficultés rencontrées par la filière-bois de notre pays telle que nous la connaissons aujourd'hui.

L'identification objective des besoins des transformateurs et utilisateurs du bois en matière de critères de qualité du bois

Les transformateurs et les utilisateurs du bois émettent des avis en apparence souvent discordants quant aux caractéristiques des arbres, des billons, des pièces et des produits finis dont ils ont besoin. Ceci n'est pas sans poser de problèmes dans la définition des classes de qualité retenues aux niveaux national et européen (contestations de la liste des critères, définie souvent à dire d'expert, entrant dans la définition des classes de qualité).

Ces "on-dit" ont d'ailleurs donné lieu à une passe d'armes fameuse dans les colonnes de cette revue (Barthod, 1988 ; Polge, 1989). Toutefois, ces discordances ne se sont pas vérifiées dans les recherches conduites à partir d'un échantillonnage adéquat et des analyses scientifiques (Mazet et Janin, 1990 ; Cavaignac *et al.*, soumis).

Il n'en demeure pas moins que, d'une façon générale, les poids relatifs des critères de qualité auxquels on peut *a priori* songer ne sont pas évalués de façon objective.

Il semble donc nécessaire de développer un premier ensemble de recherches en ce sens, recherches qui devraient aller dans deux directions :

- la mise en relation, avec des méthodologies diversifiées qui restent largement à inventer, des prix de vente observés des grumes et des produits avec les “critères de qualité *a priori*” et
- la simulation de la transformation des grumes incluant tel ou tel “critère de qualité *a priori*” afin d’apprécier son poids objectif réel sur la ou les aptitudes technologiques du ou des produits visés.

C’est l’aboutissement de telles recherches qui permettra *in fine* de proposer aux acheteurs de bois, aux différents stades de transformation, des produits correctement évalués et rangés en classes de qualité pertinentes et homogènes... et de crédibiliser les deux autres objets de recherche que nous proposons dans ce qui suit.

Une évaluation précise de la qualité de la ressource au niveau peuplement et au niveau individuel, condition d’une optimisation de sa transformation

Les récentes avancées des recherches fondées sur la modélisation conjointe “croissance-qualité” et les logiciels de simulation (Nepveu, 2000) ont démontré qu’il était possible, pour les pièces de bois susceptibles d’être débitées à partir d’une population d’arbres, de prévoir la distribution des attributs qualitatifs de ces pièces (nodosité, largeur de cerne, masse volumique) et, partant, les quantités de pièces dans les différentes classes de qualité normalisées basées sur ces attributs.

Pour le moment, l’exercice a été effectué sur l’Épicéa commun de plantation pure et équienne et validé grâce à une comparaison convaincante avec un large échantillonnage d’arbres et de pièces constitués indépendamment. L’adaptation de la méthode au cas de la ressource en Douglas a été réalisée de même qu’une opération de transfert sur *Pinus caribaea* avec des collègues australiens.

De tels outils sont aujourd’hui utilisés dans les pays forestiers du Nord de l’Europe qui ont bien compris l’intérêt de ces approches même s’ils sont susceptibles de « *gagner moins que nous* » en les appliquant, eu égard à leur ressource beaucoup plus homogène que la ressource française.

Le succès de ces recherches, succès un peu terni par le fait que nous les voyons surtout mises en application hors de nos frontières, nous rend confiant quant à la possibilité d’adapter cette méthode réaliste d’évaluation de la ressource à des cas plus difficiles (essences présentant des problèmes de forme comme le Pin maritime, le Pin sylvestre et le Hêtre ; peuplements irréguliers).

Parvenu à ce point, il faut souligner le fait que deux arbres d’un même peuplement, quand bien même auraient-ils crû de la même façon (même triplet hauteur-diamètre-âge), peuvent présenter des propriétés internes très différentes. Il s’agit de l’effet (intrinsèque) “arbre” (Guilley, 2000), effet qui est très vraisemblablement sous contrôle génétique intraprovenance. Il en résulte qu’il n’est pas possible d’évaluer précisément l’intérieur d’un billon particulier, même s’il était porteur, à son arrivée en scierie, des indications hauteur-diamètre-âge de son arbre d’origine et de sa position le long de la tige.

L’idée sur ce point est que, en ajoutant au fameux triplet une prise de données supplémentaires sur le billon en question (par exemple, son enveloppe qui pourrait être saisie à peu de frais par des capteurs laser), voire sur l’arbre d’origine, il serait possible de prévoir sa structure interne et, partant, d’en optimiser le débit. Il ne s’agit pas d’un rêve puisque l’exercice a été effectué avec le critère “angle du fil du bois” pour le Chêne (Guilley *et al.*, 1999) et que les Scandinaves optimisent déjà le tronçonnage des grumes en forêt à partir de la saisie de données individuelles sur les arbres en cours d’abattage mécanisé.

Quand on saura, par exemple, que deux chênes du même peuplement peuvent présenter des pertes de masse de 2 à 43 % à la suite de leur exposition au champignon *Coriolus versicolor* (Guilley *et al.*, 2004), on aura vite compris tout l'intérêt que l'on pourrait trouver à mettre au point des méthodes réalistes permettant d'identifier (en forêt) les "bons" arbres et, en unité de transformation, les bonnes pièces.

Une évaluation multicritère des chaînes forêt-bois et une mise en comparaison avec les filières correspondant à d'autres matériaux concurrents

Au-delà des recherches précédentes, il apparaît nécessaire, pour sécuriser et développer les parts de marché occupées par le bois, de ne pas se limiter aux aspects "quantité" et "qualité" des semi-produits et des produits susceptibles de venir en sortie de la chaîne forêt-bois. Il faut aussi évaluer et faire connaître les conséquences, en matière de développement durable, de telle ou telle stratégie de valorisation de la ressource sur d'autres aspects tels que le stockage de carbone en forêt et dans les produits, les exportations d'éléments minéraux consécutives aux exploitations, la consommation d'énergie fossile nécessaire au transport, à la transformation et à l'élaboration des produits, les revenus du sylviculteur et des transformateurs sans oublier d'évaluer l'emploi mobilisé dans les divers segments de la chaîne et, sacrifions à la mode, de prendre en compte les "aménités" de la forêt dans les divers scénarios envisageables.

Ces évaluations multicritères de chaînes d'élaboration des produits dépassent d'ailleurs la comparaison de scénarios forêt-bois : que l'on songe en effet aux nombreux secteurs où le bois se trouve en concurrence avec d'autres matériaux, secteurs qui n'attendront pas l'arme au pied que le bois, matériau écologique par excellence (*sic*), leur dame le pion.

Si la nécessité de recherches dans le domaine de l'évaluation multicritère des chaînes d'élaboration des produits est unanimement reconnue, si ceci donne lieu à moult articles, communications et mise en place de consortiums de laboratoires (Bowyer *et al.*, 2001), force est de constater que bien peu de résultats concrets sont encore disponibles dans ce domaine (Bucket *et al.*, soumis).

À ceci essentiellement deux raisons : le manque de chiffres pour décrire les maillons aval de la filière (que devient le m³ de grume de Chêne qui sort de la forêt ? Quelle quantité d'emploi est attachée à chaque douelle de tonnellerie produite ? Quelle durée de vie moyenne pour tel type de meuble ?) et la rareté des modèles de croissance et de qualité propres à simuler l'intérieur des arbres de la ressource considérée.

S'il n'est pas certain que la mise en œuvre de telles recherches se conclura à l'avantage du bois, il n'en reste pas moins que, face à la concurrence inter-matériaux, nous pouvons affirmer que, si celles-ci ne sont pas conduites, les parts du bois iront inexorablement en diminuant.

LA PRÉPARATION DE LA RESSOURCE FUTURE

Quelques faits plus ou moins avérés pour planter le décor :

- la ressource future est déjà en place, si ce n'est celle des essences à croissance rapide (Peupliers, Pin maritime) ;
- si elle continue sur sa lancée [+ 25 à + 50 % sur l'accroissement en surface terrière du Chêne sessile entre 1930 et 1990 d'après Dhôte et Hervé (2000)], la ressource forestière sera beaucoup plus abondante encore et ses caractéristiques qualitatives devraient être modifiées (Nepveu, 1999) ;
- même si cela est paradoxal en référence au point qui précède, la forêt sera probablement davantage confrontée à des épisodes climatiques difficiles pour elle ;

- la demande sociale sur les fonctions de la forêt autres que la production restera forte ;
- le développement technologique aura facilité les possibilités de traçabilité des grumes et des produits (diminution des prix des puces et assimilés et amélioration de leur fiabilité) et les ordinateurs auront encore augmenté leur puissance de calcul.

Dans ce contexte, et en se limitant aux spécificités de la ressource de l'avenir, nous voyons la recherche apporter essentiellement sa contribution aux deux objectifs présentés ci-après.

L'évaluation de la ressource future, son aménagement en vue d'optimiser son utilisation

Quand bien même la forêt de notre pays cesserait de s'étendre, l'augmentation considérable de sa productivité prévue pour les prochaines décennies et ses conséquences en matière de caractéristiques des produits est susceptible de modifier très largement le paysage de la filière-bois... dans la mesure, bien sûr, où ses acteurs ont la volonté de tirer parti de cette nouvelle situation.

Dans ce contexte, la recherche a une carte décisive à jouer dans la prévision de l'évolution qualitative et quantitative des caractéristiques de la ressource aux différents pas de temps qui seront considérés. Cette ressource étant pour l'essentiel déjà en place, il conviendra pour cela de prévoir l'intérieur des arbres d'ores et déjà existants mais aussi de prévoir leur croissance et les propriétés de leur bois pour les cerne qui vont se mettre en place dans le futur. Sur la base de l'expérience acquise récemment sur ce plan dans un nombre limité de cas en tenant compte d'ailleurs parfois de considérations "environnement" en sus de celles relevant de la croissance et de la qualité du bois, l'atteinte d'un tel objectif semble tout à fait possible.

Ces recherches devraient permettre de répondre à des questions du gestionnaire forestier telles que celle-ci : « *si j'applique telle sylviculture sur ma ressource d'aujourd'hui, quelles seront ses caractéristiques dans 30, 40..., 100 ans ?* ».

On peut aussi avoir l'ambition de répondre à une autre question, relevant cette fois de l'optimisation multicritère, du genre de celle-ci : « *Je souhaite que, dans 40 ans et pour les années ultérieures, la forêt française, qui est comme elle est aujourd'hui, puisse fournir à la société tels et tels produits en respectant les critères de développement durable. Comment dois-je l'aménager ?* ». Le traitement d'une telle question est beaucoup plus complexe que celui de la précédente qui en constitue cependant un pré-requis indispensable. Nous pensons qu'il est nécessaire qu'il soit abordé au cours des prochaines années.

L'identification des phénotypes à bois de qualité à réserver pour les coupes de régénération, la sélection de bons génotypes pour la génération qui suit

Les arbres des coupes de régénération procurant l'essentiel du revenu du sylviculteur, on comprend facilement qu'il serait intéressant, sous réserve qu'ils présentent par ailleurs des caractéristiques de croissance et de forme acceptables, de ne pas perdre les individus "à bon bois" à l'occasion des coupes d'amélioration. Pour ce faire, il conviendrait de développer des recherches permettant d'identifier de manière réaliste les bons phénotypes de ce point de vue. Comme cela a déjà été fait avec succès sur le Chêne (Guilley *et al.*, 1999), et sans aller jusqu'à préconiser des carottages, ceci pourrait passer par la mise à jour de corrélations entre les propriétés internes et des descripteurs externes (contenu des feuilles en polyphénols comme marqueurs de la durabilité naturelle ?). Nous pouvons aussi espérer que les développements des techniques non invasives d'auscultation des matériaux seront suffisants afin de pouvoir être adaptées de façon réaliste au cas des arbres sur pied.

Ce qui vient d'être dit au sujet des arbres des coupes d'amélioration est bien entendu valable au niveau des coupes de régénération tant il est important de ne laisser participer à la consti-

tution de la génération suivante que les géniteurs supérieurs du point de vue de la qualité intrinsèque de leur bois. À la différence du cas des coupes d'amélioration où le respect d'une telle condition est sans objet, il conviendra toutefois de s'assurer, grâce au développement de recherches *ad hoc* et originales, de l'importance du contrôle héréditaire sur le caractère-cible visé par cette sélection "douce".

Il importera également d'avoir conduit des recherches propres à évaluer les conséquences d'une amélioration attendue du caractère-cible. Éclairons ce propos en prenant le cas de la durabilité naturelle du bois du Chêne sessile dont l'énorme variabilité individuelle a déjà été soulignée dans cet article. Imaginons que ce caractère soit très héritable, que l'on ait découvert un descripteur permettant d'identifier avec précision les individus supérieurs de ce point de vue et de ne maintenir que ceux-ci pour contribuer à la régénération de la chênaie française : qu'advient-il des autres propriétés qui lui sont corrélées et quelles conséquences sont à attendre pour la filière Chêne ?

CONCLUSIONS

Nombre de rapports se sont déjà penchés au chevet de notre filière-bois. Presque tous ont conclu à la nécessité d'aller vers une meilleure connexion entre la forêt et les industries du bois. Les effets de ces rapports se font toutefois encore largement attendre. On entend même se répandre, pour le moment sous le manteau, l'idée selon laquelle il est vain, dans les conditions de notre pays, d'espérer parvenir un jour à cette fameuse connexion forêt-bois pourtant à l'œuvre sous d'autres cieux, d'où la tentation de laisser les choses aller à vau-l'eau et de se concentrer sur les fonctions non marchandes de la forêt. Nous ne partageons pas ce dernier point de vue.

Nous pensons que la recherche est en mesure d'apporter une contribution importante à cette connexion et, de ce fait, de la transformer en objectif possible à atteindre. Nous espérons avoir contribué à le démontrer dans ces quelques lignes.

Reprenant à notre compte le sous-titre d'un rapport récemment publié (Juillot, 2003), nous pensons qu'il conviendrait de compléter les recherches dont nous avons préconisé le développement par une évaluation économique, pour la filière, de leur aboutissement (Qu'est-ce que je gagnerais si, au lieu d'acheter "au doigt mouillé" les épicéas dont j'ai besoin, je les évaluais avec le logiciel WinEPFIN de l'INRA ? Qu'est-ce que je gagnerais si, au lieu de débiter mes billons en ne tenant compte que de leur diamètre fin bout, je tenais compte de leur structure interne estimée plus ou moins lourdement ?). Les éléments dont nous disposons d'ores et déjà nous indiquent que cette évaluation économique constitue une perspective réaliste. Elle nous semble indispensable pour convaincre les producteurs et les transformateurs du bois, ainsi informés des avantages qu'ils pourraient en tirer, de s'inspirer des pratiques à l'œuvre dans des pays forestiers du Nord dans lesquels, pourtant, la variabilité des caractéristiques de la ressource est beaucoup plus faible qu'en France.

Gérard NEPVEU
Responsable Équipe Qualité des Bois
INRA UMR 1092
F-54280 CHAMPENOUX
(nepveu@nancy.inra.fr)

BIBLIOGRAPHIE

- BARTHOD (Ch.). — Bois de qualité et qualité des bois : quelques réflexions. — *Revue forestière française*, vol. XL, n° 6, 1988, pp. 423-431.
- BOWYER (J.), BRIGGS (D.), JOHNSON (L.), KASAL (B.), LIPPKE (B.), MEIL (J.), TRUSTY (W.), WEST (C.), WILSON (J.), WINISTORFER (P.). — Corrim, a report of progress and a glimpse of the future. — *Forest Products Journal*, vol. 51, n° 19, 2001, pp. 10-22.
- BUCKET (E.), LE MOGUÉDEC (G.), MOTHE (F.), NEPVEU (G.). — Une première tentative de modélisation des bilans “environnement” et “produits” de sylvicultures contrastées. Partie 1 : cas du Chêne sessile. — Soumis à la *Revue forestière française*.
- CAVAIGNAC (S.), LE MOGUÉDEC (G.), PRÉGET (R.), IBANEZ (L.). — Prix du bois de Chêne et hétérogénéité des lots. — Soumis à la *Revue forestière française*.
- DHÔTE (J.-F.), HERVÉ (J.-Ch.). — Changements de productivité dans quatre forêts de Chênes sessiles depuis 1930 : une approche au niveau du peuplement. — *Annals of Forest Science*, vol. 57, 2000, pp. 651-680.
- GUILLEY (E.). — La Densité du bois de Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) : élaboration d'un modèle pour l'analyse des variabilités intra- et interarbre ; origine et évaluation non destructive de l'effet “arbre” ; interprétation anatomique du modèle proposé. — Document LERFoB, 2004. — 213 p. (Thèse de Docteur de l'ENGREF soutenue le 14 avril 2000).
- GUILLEY (E.), LOUBÈRE (M.), NEPVEU (G.). — Identification en forêt de Chênes sessiles (*Quercus petraea*) présentant un angle du fil du bois intrinsèquement faible. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 29, n° 12, 1999, pp. 1958-1965.
- GUILLEY (E.), NEPVEU (G.), CHARPENTIER (J.-P.), AYADI (N.), SNAKKERS (G.), CHARRIER (B.). — The variability of decay resistance in Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) : analysis of the between-tree effect, correlations with tree growth and basic properties. — *Wood Science and Technology*, vol. 38, n° 1, 2004, pp. 539-554.
- JUILLOT (D.). — La Filière-bois française : la compétitivité, enjeu du développement durable. — *Revue forestière française*, vol. LV, n° 3, 2003, pp. 185-296.
- MAZET (J.-F.), JANIN (G.). — La Qualité de l'aspect des placages de chênes : mesures de couleur et critères d'appréciation des professionnels français et italiens. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 47, 1990, pp. 255-268.
- NEPVEU (G.). — Possible effects on wood quality to expect from accelerating tree growth in Europe : tentative answers and questions to accommodate. — Actes du Colloque de l'European Forest Institute “Causes and consequences of accelerating tree growth in Europe” / T. Karjalainen, H. Spiecker et O. Larroussinie Éditeurs, Nancy, 14-16 mai 1999. — n° 27, 1999, pp. 181-195.
- NEPVEU (G.). — “Du plant à la planche” ou Comment prévoir la qualité de la ressource forestière pour l'industrie. — *Inra mensuel*, n° 107, 2000, pp. 7-9.
- POLGE (H.). — Oui ! La production de bois de qualité est une option raisonnable pour le sylviculteur. — *Revue forestière française*, vol. XLI, n° 6, 1989, pp. 527-532.

RESSOURCE FORESTIÈRE, TRANSFORMATION ET UTILISATION DU BOIS : LES PROMESSES DE L'APPROCHE DÉTERMINISTE POUR OPTIMISER ET INNOVER

PATRICK PERRÉ

Traditionnellement, les propriétés du bois et la “qualité du bois”, une grandeur synthétique définie plus ou moins précisément à l'aide d'un ensemble de propriétés, ont été abordées en sciences du bois sous l'angle de la biométrie. Ces approches, qui utilisent tout le cortège des outils développés par les statisticiens, ont permis toutes les grandes avancées des travaux permettant de définir la ressource forestière et de dessiner les grandes lignes des relations entre croissance et qualité du bois. Elles permettent également de mettre en place des modèles corrélatifs rapidement opérationnels. Ce secteur de recherche sur le bois est encore très actif et porteur d'importants espoirs pour aider la gestion aux échelles de la parcelle, du peuplement et du massif (voir l'article de Gérard Nepveu, p. 195).

Parallèlement à ces approches corrélatives, les chercheurs ont depuis longtemps également entrepris des recherches souvent considérées comme plus fondamentales, visant à mieux comprendre le pourquoi des propriétés du bois. Parmi ces travaux, ceux relatifs au comportement mécanique et au retrait sont probablement les plus anciens (Kollmann et Cote, 1968). Pendant longtemps, ce type d'étude semblait se cantonner à la belle science, apanage de quelques illuminés. Dans ce qui suit, nous essaierons de montrer comment les pièces d'un immense puzzle se mettent aujourd'hui en place pour hisser ces approches déterministes au rang d'outils opérationnels capables de prédiction et d'accompagnement à l'adaptation et à l'innovation.

LE CONTEXTE FAVORABLE À L'APPROCHE DÉTERMINISTE

Des formulations physiques, mécaniques et chimiques éprouvées

Les procédés de transformation du bois sollicitent ses propriétés mécaniques (usinage, séchage, mise en forme, collage, assemblage), mettent en place des transferts couplés de chaleur et de masse (étuvage, séchage, collage, imprégnation...) et sont souvent le siège de réactions chimiques (préservation, collage, séchage, traitement thermique). Le plus souvent, ces trois familles de phénomènes — physique, mécanique et chimique — interagissent de façon complexe. Par exemple :

- les niveaux de température et de teneur en eau influent fortement le comportement mécanique du bois, notamment son comportement viscoélastique,
- le retrait du bois, résultat du changement de teneur en eau liée, est l'effet responsable des contraintes de séchage,
- la stabilisation du bois par traitement thermique nécessite des réactions chimiques activées par le niveau de température, à condition que ce niveau soit maintenu sur une durée de plusieurs heures...

Les fondements modernes des sciences de l'ingénieur ont été conceptualisés et formulés durant le XVII^e siècle, notamment avec la mise en place de la mécanique céleste, par Képler, Huygens et Newton notamment (Germain, 1986). C'est durant ce siècle qu'est né le grand espoir — bien

ébranlé depuis — du pouvoir déterministe de la science. Hooke (1678), contemporain de Newton, a posé les premières bases de la mécanique du milieu déformable (*ut tensio sic vis*), plus tard généralisées par Cauchy. Il faut attendre près de deux siècles pour que le formalisme soit aussi avancé pour les autres pans des sciences de l'ingénieur : Fourier (1822), Fick (1855) et Darcy (1856). Enfin, il peut être surprenant de savoir que les formulations physiques complètes utilisées actuellement sont beaucoup plus récentes, quelques décennies tout au plus :

- les transferts couplés de chaleur et de masse en milieu poreux ont vu leurs premières formulations modernes proposées par Kirscher, par de Vries et par Luikov, dans les années 1950 et 1960. L'explication de ces équations par les techniques de changement d'échelle a été développée plus tard par Whitaker (1977), et les premières applications de ces théories au bois sont l'œuvre de chercheurs français (Moyne, 1984 ; Perré, 1987) ;

- la formulation de l'équilibre mécanique dans le cas du bois, qui a un comportement fort complexe et qui possède la particularité d'avoir un retrait très important source d'une génération interne de contrainte, est encore plus récente (Ranta-Maunus, 1975 ; Kawai, 1980 ; Gril, 1988 ; Hunt, 1989) et nécessite encore beaucoup de travaux, par exemple pour savoir si les effets visco-élastiques et mécano-sorptifs sollicitent les mêmes mécanismes moléculaires ;

- le bois est un assemblage fort complexe de macromolécules végétales, structurées sous la forme de multicouches à l'échelle de la paroi. Seuls les outils modernes d'investigation (HPLC, diffusion de rayons X, spectroscopie de masse, RMN) permettent de mieux comprendre la structure de ces macromolécules et leurs propriétés chimiques. Beaucoup reste à faire, mais il n'est plus utopique aujourd'hui de mettre certaines réactions chimiques en équation (Rousset, 2004).

De cette courte projection historique, nous pouvons conclure que le chercheur a aujourd'hui à sa portée tout un éventail de formulations physique, mécanique et chimique relativement bien établies et généralement validées, au moins pour les deux premières familles. Grâce à une présence significative et active en sciences du bois, la France figure en bonne place dans l'élaboration de ces connaissances. Le soutien apporté par le programme interministériel concerté "bois matériau" et par le programme "matériaux" du CNRS a d'ailleurs joué un rôle essentiel pour maintenir cet effort national au cours de la dernière décennie (Castera, 2001 ; Gril, 2001 ; Napoli, 2003 ; Perré 2000, 2004).

Des outils numériques de plus en plus performants

Les formulations abordées ci-dessus produisent généralement des systèmes complexes d'équations différentielles couplées et non-linéaires, qui doivent être assorties de la définition de la configuration (domaine d'étude), de conditions aux limites et, pour les problèmes évolutifs, de conditions initiales. Pendant longtemps, ces systèmes échappaient aux méthodes de résolution des mathématiques appliquées. Seules des versions très simplifiées, voire simplistes, des systèmes réels pouvaient être résolues.

Cependant, grâce à l'existence des ordinateurs, des méthodes dites "numériques" se sont développées. Notons que, sur les vingt dernières années, le gain observé en temps de calcul, donc en complexité des problèmes accessibles à la simulation, a crû de façon considérable (de l'ordre de 6 puissances de dix pour des machines courantes). Une partie de ce gain est bien entendu simplement dû à l'augmentation de la puissance des ordinateurs, mais, et cela est certainement moins connu, l'autre partie provient en proportion équivalente des progrès effectués en mathématiques appliquées.

Ces progrès permettent aux simulations de se rapprocher des cas réels. La figure 1 (p. 203) montre l'exemple d'un maillage par éléments finis d'une section de Pin maritime (Perré, 2004). Le maillage est construit à partir de l'image de la section, il prend en considération les directions matérielles locales du bois et les variations de densité entre bois initial et bois final. Ce

maillage est ensuite utilisé pour la résolution des équations de transfert et le calcul des contraintes de séchage initiées par le retrait (Perré et Turner, 1999).

Un autre exemple du réalisme atteint aujourd'hui par la simulation numérique est la prédiction tri-dimensionnelle du comportement en déformation d'ouvrages en bois tels que des panneaux, des pièces contrecollées ou des cadres de porte (Osmarsson, 2001). Dans ces travaux, les variations des propriétés du bois dans la grume, la pente du fil et le plan de débit sont pris en considération.

Des capteurs à haut débit

Le bois présente une forte variabilité naturelle et les formulations précédentes doivent être alimentées par de nombreux paramètres également variables. La caractérisation des propriétés nécessaires pour alimenter ces formulations sont parfois encore bien éparpillées. À l'encontre de l'ère du monde virtuel encouragé par les nouvelles technologies, les chercheurs en sciences du bois et les centres techniques doivent renforcer leurs efforts en matière de caractérisation.

Dans cette tâche, ils sont aidés par les impressionnantes possibilités offertes par les nouveaux capteurs, plus performants, plus précis, plus rapides et moins invasifs. Les "sondes" d'aujourd'hui ne sont plus matérielles : rayonnements ionisants (rayons X, rayons- γ), rayonnements électromagnétiques (hautes fréquences, micro-ondes), ultrasons, visible, UV, IR, RMN, laser... Les analyses des signaux sont de plus en plus sophistiquées : analyse spectrale, tomographie, RMN bi-dimensionnelle, analyse d'image, méthodes inverses.

Grâce à leurs performances et à leur rapidité, ces techniques sortent du laboratoire : des scanners de forme extérieure des grumes sont déjà couramment diffusés en scierie. Des scanners de densité du bois (rayons- γ) ou de densité et teneur en eau du papier existent.

L'étape suivante sera la vision interne des grumes (tomographie X), avec des résolutions de plus en plus fines. Aidé par les outils numériques, avec un apprentissage en ligne, le CND (contrôle non destructif) peut maintenant faire son entrée sur les chaînes de production.

QUELQUES RÉALISATIONS

Les propriétés du bois expliquées par son anatomie

Les arbres sont des végétaux à croissance secondaire : les méristèmes primaires mettent en place la structure et l'architecture de l'arbre (croissance primaire de la plante) à la suite de quoi

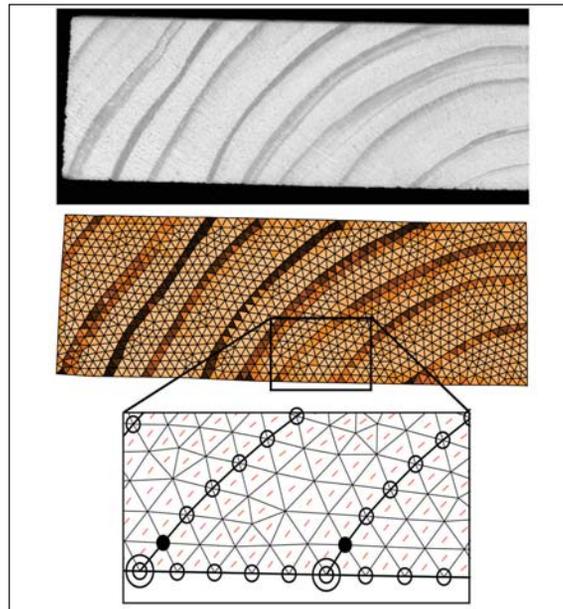
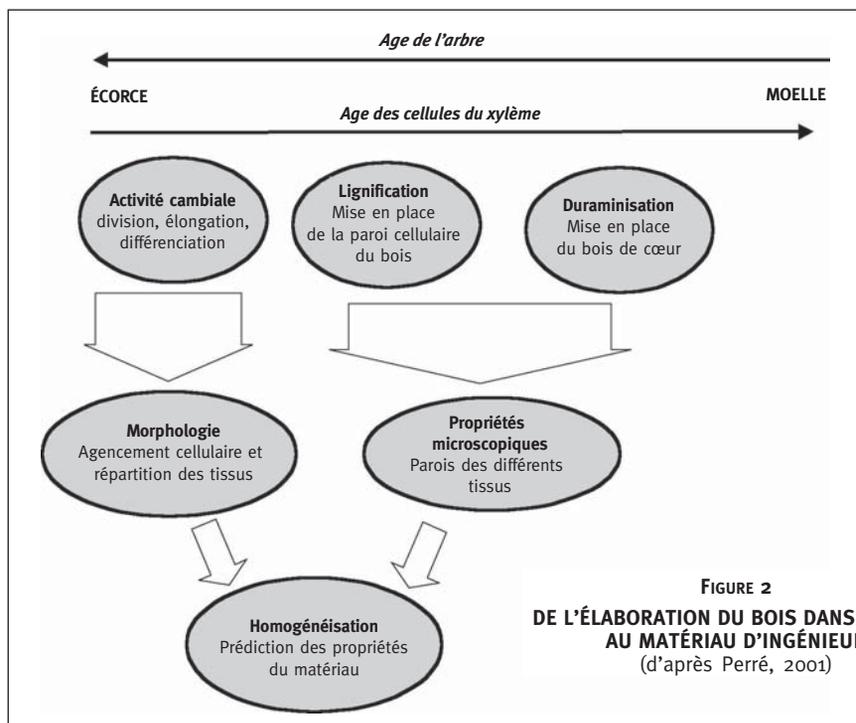


FIGURE 1 MAILLAGE D'UNE SECTION DE PIN MARITIME

Le zoom d'une partie de l'image montre comment les directions locales d'anisotropie sont spécifiées dans chaque élément du maillage (d'après Perré, 2004)

un méristème secondaire, le cambium, présent sur toute la périphérie de la tige, forme des couches successives par division cellulaire et met en place un système vasculaire par différenciation cellulaire. La plupart des cellules ainsi formées vivront quelques semaines seulement, à la suite de quoi la paroi lignifiée est mise en place. L'anatomie du bois et la composition/organisation de ses parois sont le produit de cette croissance secondaire (figure 2, ci-dessous).



Ces deux caractéristiques sont également les données de base qui sont prises en considération pour expliquer et prédire les propriétés macroscopiques par changement d'échelle.

Ce type de prédiction est un enjeu majeur, pour mieux connaître le matériau, notamment son comportement limite, mais aussi pour mieux comprendre et maîtriser les relations entre production en forêt et propriétés du matériau. Les techniques d'homogénéisation (Sanchez-Hubert et Sanchez-Palencia, 1992 ; Hornung, 1997), qui font partie des méthodes de changement d'échelle, ont été appliquées avec succès au bois. Ces techniques permettent de prédire les propriétés macroscopiques d'un matériau à partir de la morphologie et des propriétés des éléments constitutifs microscopiques. En dépit de ses promesses séduisantes, il faut garder à l'esprit que cette approche a deux exigences incontournables :

- décrire la morphologie des pores,
- obtenir les propriétés des constituants de base.

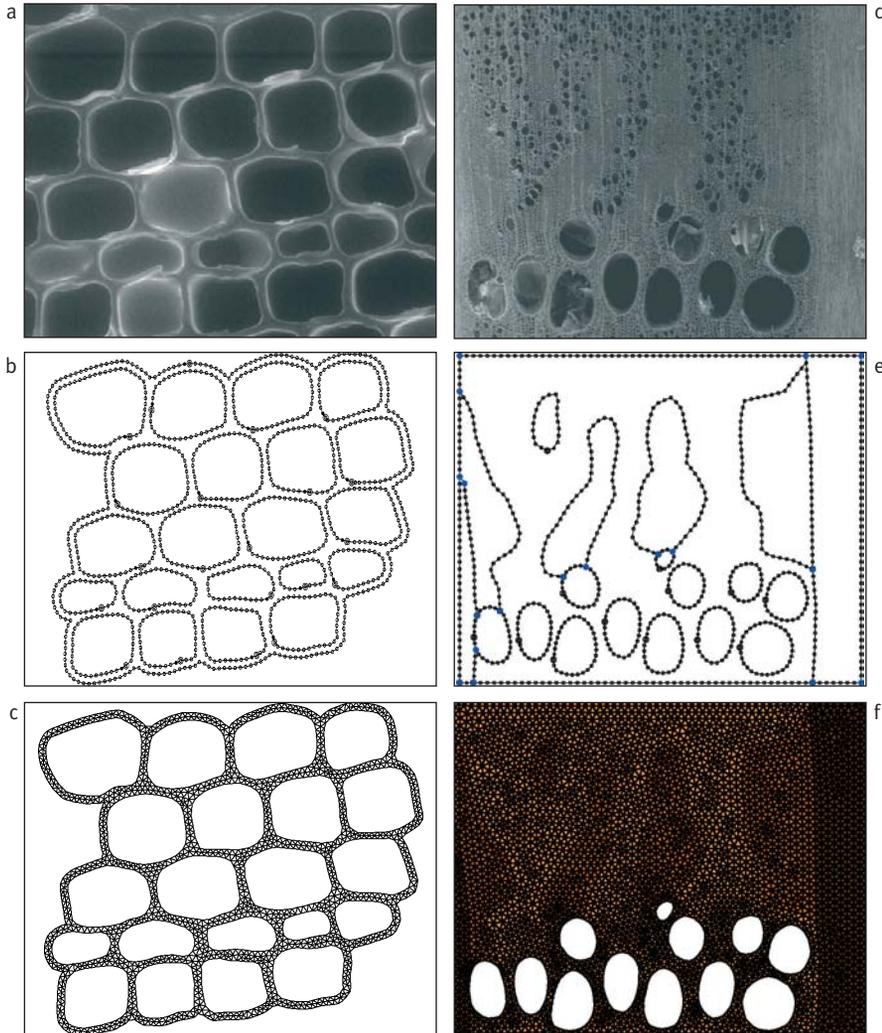
La caractérisation des éléments de base a nécessité la mise au point de dispositifs spécifiques de caractérisation expérimentale : mesure du retrait sur microéchantillons, essais micromécaniques, imagerie X digitale, diffraction de rayons X (Lahbabi, 1995 ; Badel, 1999 ; Farruggia, 1998 ; Perré, 2000). Le maillage numérique de la structure réelle est l'un des points clés de l'application de l'homogénéisation au matériau bois.

FIGURE 3

**DEUX EXEMPLES DE CONSTRUCTION DE MAILLAGES NUMÉRIQUES
À PARTIR D'IMAGES RÉELLES DE BOIS**

(zone de bois initial d'Épicéa, à gauche et accroissement annuel de Chêne, à droite)

Les images ont été obtenues en microscopie électronique à balayage environnementale
(LERMAB-ENGREF, d'après Perré, 2004)



Tous les calculs sont donc effectués en construisant des maillages numériques à partir d'images anatomiques de bois (figure 3, ci-dessus).

Parmi les résultats obtenus récemment, on peut retenir :

- la prédiction de l'anisotropie transverse de la rigidité des tissus du bois grâce à la morphologie de l'agencement cellulaire, reflet du fonctionnement cambial,
- la compréhension et la prédiction de l'anisotropie du retrait grâce à la prise en compte de la forme des cellules et des propriétés locales de la paroi,
- la prédiction précise (erreur inférieure à 15 % en direction radiale et 5 % en direction tangentielle) du retrait du Chêne en prenant en considération la proportion et la forme des tissus au niveau de l'accroissement annuel.

L'outil numérique pour le comportement mécanique du matériau

En dépit de sa complexité, le comportement mécanique différé du bois est maintenant relativement bien connu, au moins pour quelques essences dont l'Épicéa. Les scientifiques savent donc alimenter les codes de calcul numérique par des modèles de comportement valables sur de larges plages de variations des paramètres physiques (température, teneur en eau, temps). Les simulations numériques sont donc à la fois réalistes et douées de prédiction. En d'autres termes, elles peuvent donner, sur des configurations géométriques réelles, la réponse à des conditions inédites, c'est-à-dire des conditions de chargement mécanique, thermique, hydrique et temporel non disponibles dans la base expérimentale existante.

Parmi les nombreuses réalisations, voici trois exemples représentatifs :

- des modes de conception d'ouvrages peuvent être imaginés à l'aide de pièces de bois qui, prises individuellement, se déforment fortement mais qui, une fois assemblées, se déforment très peu parce que leurs tendances naturelles sont contrariées (Ormarsson, 2001),
- le fluage à long terme de structures mixtes (bois-béton) de taille d'emploi a été prédit avec succès en fonction du chargement mécanique et des conditions climatiques (température et humidité relative en fonction du temps) (Bou-Saïd, 2003),
- des tables de séchage adaptées aux fortes sections ont été proposées grâce à la simulation numérique, après une phase d'apprentissage sur des sections normales (Rémond, 2004). Effectué en collaboration avec le CTBA, ce travail sera naturellement diffusé auprès de la profession.

Le traitement thermique du bois simulé à l'échelle de la pile

Le traitement thermique permet de conférer au bois des propriétés intéressantes (durabilité et stabilité dimensionnelle) au détriment d'autres propriétés (résilience mécanique notamment). La température finale de réaction et le temps de séjour sont les deux facteurs déterminants de la qualité finale du matériau. Cependant, la très faible conductivité thermique du bois induit un traitement plus long en surface qu'à cœur, notamment pour les pièces épaisses. L'hétérogénéité des conditions dans les fours industriels pose aussi de sérieux problèmes. C'est pourquoi les produits industriels ne tiennent souvent pas les promesses des essais de laboratoire (Kamdern *et al.*, 1999).

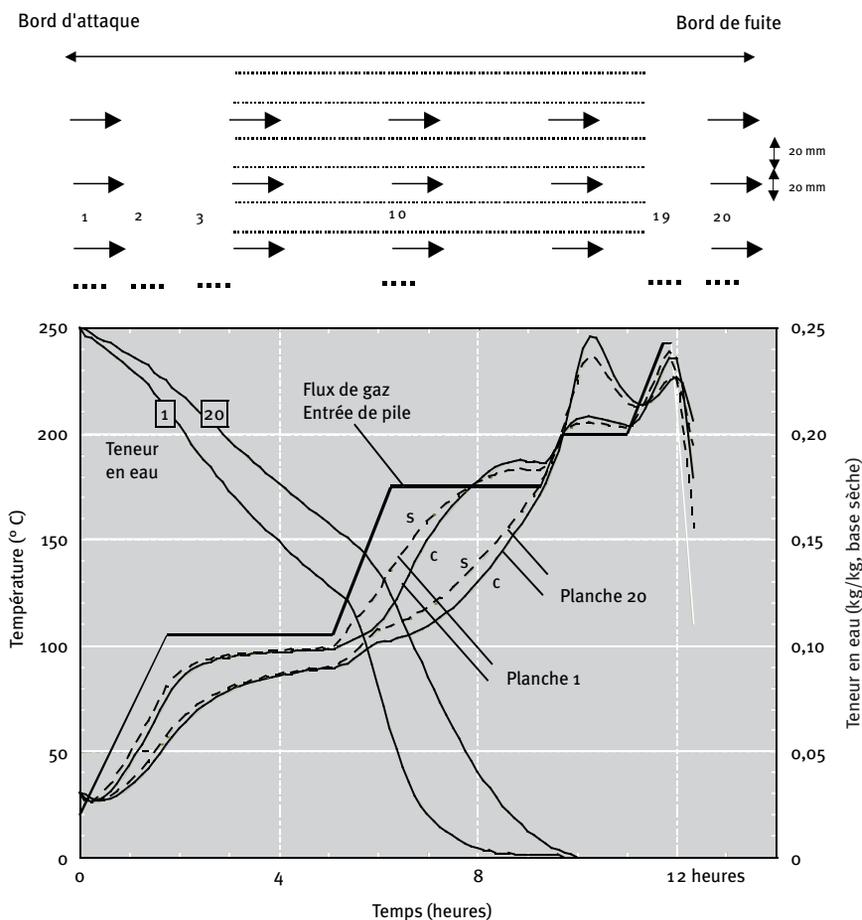
Grâce à une collaboration entre le CIRAD, QUT (School of Mathematics, Brisbane, Australie) et le LERMAB, un modèle numérique inédit a été développé. Ce modèle comporte deux innovations majeures :

- la prise en compte des réactions chimiques déclenchées par le niveau de température et les énergies de réaction associées (endo- ou exothermiques),
- une approche multiéchelles permettant de traiter deux échelles simultanément (planche et pile) et les couplages existant entre ces échelles.

La figure 4 (p. 207) propose un exemple de simulation sur un four industriel. La température du gaz en bord d'attaque correspond à une conduite industrielle de traitement thermique. La différence entre cette température de gaz et les températures simulées au sein de la première planche (n° 1, surface et cœur) provient des transferts couplés de chaleur et de masse entre l'air et la planche et au sein de la planche. Mais la situation est encore plus complexe pour les planches suivantes. Dans une pile, l'air se refroidit et s'humidifie au fur et à mesure qu'il circule entre les lits de planches. Ceci a pour conséquence la réduction de la vitesse de séchage au fur et à mesure que l'on s'éloigne du bord d'attaque. La planche du bord de fuite (n° 20 ici) sèche donc beaucoup moins vite que la planche du bord d'attaque (n° 1). Elle reste ainsi à une température nettement plus basse durant les huit premières heures du traitement. En revanche, lorsque les

FIGURE 4

**EXEMPLE DE SIMULATION EN DOUBLE ÉCHELLE (PLANCHE + PILE)
DU TRAITEMENT THERMIQUE DU BOIS
(conduite de type industriel, teneur en eau initiale des planches de 25 %)**



réactions exothermiques sont activées, l'inverse se produit : les planches chauffent le gaz et la surchauffe est beaucoup plus marquée pour la dernière planche de la pile (n° 20). Cette dernière subit un pic à 250 °C non voulu par la table de traitement et préjudiciable à la qualité.

Ce modèle est un véritable outil de transfert : il permet de tester plusieurs configurations (table de traitement, épaisseur des baguettes, vitesse du flux de gaz...) afin de sélectionner celle qui produit le traitement le plus homogène sur toute la pile.

QUELQUES DÉFIS POUR LE FUTUR

Des critères de propriétés dans la sélection génétique

À une époque où la biodiversité est sur les lèvres de tous les gestionnaires d'écosystèmes, les plantations sont souvent décriées. Il faut cependant garder à l'esprit que les plantations, qui concernent 3 % et bientôt 5 % de la surface forestière mondiale, assurent 30 % de la produc-

tion de bois et permettent ainsi, par une partition du territoire, de sauvegarder des territoires riches et sensibles. Grâce à la courte période de révolution et à une intervention humaine plus soutenue, les plantations constituent le creuset idéal de recherches de pointe en matière d'amélioration et de sélection génétique. Après l'amélioration de la production en volume, puis en conformation des arbres (rectitude chez le Pin maritime, distance d'entre-nœud chez le Pin radiata...), des travaux de recherche sont aussi initiés pour améliorer certaines des propriétés du bois produit (anisotropie de retrait, homogénéité ou moindre hétérogénéité intra-cerne, bois de réaction...). Dans ce domaine, des pays comme la Nouvelle-Zélande ou le Chili sont à la pointe et sont demandeurs d'outils permettant de décrire et de prédire les propriétés recherchées. L'approche déterministe décrite succinctement plus haut est ici parfaitement adaptée. Les compétences de plusieurs équipes françaises sont d'ailleurs sollicitées par ces pays, avec le risque de transférer hors d'Europe les résultats de notre recherche publique.

La prise en compte de la variabilité naturelle

Tant dans les cours de formation des ingénieurs que du point de vue des industriels, la variabilité du bois est généralement perçue comme un handicap majeur. Jusqu'à très récemment, seules les méthodes statistiques étaient capables de traiter cette variabilité. Mais grâce à la rapidité actuelle de l'exécution des codes de calcul, ce qui était utopique hier est abordé aujourd'hui dans les laboratoires et devient une promesse crédible sur le moyen terme en tant qu'outil opérationnel. Plus précisément, il s'agit de conserver l'approche déterministe capable de décrire les phénomènes physiques, mécaniques et chimiques, mais de greffer la variabilité des propriétés du bois afin de reconstituer de façon réaliste le comportement d'un lot complet. Dans ce cas, on peut accéder non seulement au comportement moyen, mais aussi savoir comment la variabilité des propriétés de base se transmet, via les mécanismes mis en équations. Deux exemples :

- prédire le comportement d'un assemblage mécanique de pièce de bois, y compris du point de vue de la sécurité (génie civil),
- optimiser le séchage du bois à l'échelle d'une pile entière, seule voie acceptable pour passer de l'approche empirique à l'approche prédictive.

Les méthodes de Monte-Carlo sont bien adaptées à ces objectifs, mais d'autres doivent encore être inventées et développées pour traiter les cas pour lesquels les répétitions ne sont pas indépendantes (cas typique de l'approche multiéchelles présentée dans le paragraphe "traitement thermique", p. 206).

La valorisation "en ligne" de la biodiversité

L'impossible a besoin d'être imaginé avant de devenir réalité. Alors, en guise de conclusion, rêvons un peu. Si l'on cumule le potentiel promis par le traitement déterministe de la variabilité et celui promis par les progrès en contrôle et mesure non-destructifs, il devient possible de transformer la variabilité en avantage industriel. Imaginons un scanner à rayons X assez précis et rapide pour donner une image de chaque billon entrant dans une scierie avec une résolution de l'ordre de 100 µm. Non seulement la forme et les nœuds peuvent alors être repérés, mais aussi la structure des cernes et, grâce aux outils de changement d'échelle, une série de propriétés locales (rigidité, retrait, texture). L'optimisation du débit et une bonne logistique (traçabilité) peuvent alors tirer parti de toutes ces informations pour des objectifs multiples et non exclusifs :

- constitution de lots homogènes pour optimiser le séchage,
- affectation des pièces les plus rigides pour des utilisations structurales,
- affectation des pièces les plus isolantes thermiquement pour les parois.

La vision volumique dans l'opaque peut également être utilisée au cours de la chaîne de transformation pour suivre et classer les pièces en fonction de l'efficacité du traitement volumique de préservation, pour vérifier le niveau de densification d'un procédé thermo-hydro-mécanique, la teneur en eau...

La qualité et l'homogénéité des lots ainsi obtenus (tant du point de vue des propriétés de base que du suivi des procédés de transformation) doivent naturellement s'exprimer sous la forme de certification (propriétés structurelles, isolation thermique, classe de durabilité conférée par un traitement chimique ou thermique, traitement phytosanitaire NIMP 15...).

Patrick PERRÉ
Ingénieur en Chef du GREF
Directeur du LERMAB
ÉCOLE NATIONALE DU GÉNIE RURAL,
DES EAUX ET DES FORÊTS
14, rue Girardet
CS 4216
F-54042 NANCY CEDEX
(perre@engref.fr)

BIBLIOGRAPHIE

- BADEL (E.). — Détermination des propriétés élastiques et du retrait d'un cerne annuel de Chêne dans le plan transverse : description de la morphologie, mesure des propriétés microscopiques et calculs d'homogénéisation. — ENGREF, 1999 (Thèse de Doctorat).
- BOU-SAÏD (E.). — Contribution à la modélisation des effets différés du bois et du béton sous conditions climatiques variables. Application aux structures mixtes bois-béton. — INSA Lyon, 2003 (Thèse de Doctorat).
- CASTERA (P.), coordinateur. — Architecture et propriétés multi-échelles de matériaux fibreux cellulose modélisés par des milieux aléatoires, rapport du projet Fi-Cell. — Bordeaux : LRBB, 2001.
- DARCY (H.). — Les fontaines publiques de la ville de Dijon. — Victor Dalmont éd., Libraire des Corps impériaux des Ponts et Chaussées et des Mines, 1856.
- FARRUGGIA (F.). — Détermination du comportement élastique d'un ensemble de fibres de bois à partir de son organisation cellulaire et d'essais mécaniques sous microscope. — ENGREF, 1998 (Thèse de Doctorat).
- FICK (A.). — Über Diffusion. — *Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie*, vol. 94, 1855, pp. 59-86.
- FOURIER (J.). — Théorie analytique de la chaleur. — Paris : Firmin Didot Père et Fils, 1822.
- GERMAIN (P.). — Mécanique. — Palaiseau : École polytechnique ; Ellipse, 1986.
- GRIL (J.). — Une modélisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure. — Paris : Université Pierre et Marie Curie, 1988 (Thèse de Doctorat).
- GRIL (J.), coordinateur. — Loi de comportement thermo-hygro-mécanique du bois à haute température. Rapport final de contrat MAPA-UM2 n° 01.40.34/98, 6.01. — Montpellier : LMGC, 2001. — 113 p.
- HOOKE (R.). — *De Potentia Restitutiva*. — London, 1678. — cited in : Proceedings of the Royal Institution of Great Britain, 67, 1996, pp. 239-275.
- HORNUNG (U.) Ed. . — Homogenization and porous media. — Berlin : Springer Verlag, 1997.
- HUNT (D.). — Linearity and non-linearity in mechano-sorptive creep of softwood in compression and bending. — *Wood Science Technology*, vol. 23, 1989, pp. 323-333.
- KAMDEM (D.P.), PIZZI (A.), GUYONNET (R.), JERMANNAUD (A.). — Durability of heat-treated wood. — The International Research Group on Wood Preservation, 30th Annual General Meeting, Rosenheim, Germany, June 1999. — IRG, 1999 (document IRG/WP 99-40145).
- KAWAI (S.). — Moisture movement and drying stresses in wood. — Kyoto : Faculty of Agriculture, 1980 (Doctor Dissertation).
- KOLLMANN (F.P.), COTE (W.A.). — Principles of Wood Science and Technology. Vol. 1 : Solid Wood. — Springer Verlag, 1968.
- LAHBABI (R.). — Mesure par analyse d'image de paramètres microscopiques requis pour une prédiction déterministe des propriétés du bois. — ENGREF, 1995 (Thèse de Doctorat).
- MOYNE (Ch.). — Contribution à l'étude du transfert simultané de chaleur et de masse au cours du séchage sous vide d'un bois résineux. — Nancy : INPL, 1984 (Thèse de Docteur Ingénieur).

- NAPOLI (A.), coordinateur. — Caractérisation des propriétés de transfert dans le bois : méthodes rapides pour la détermination en routine de la diffusivité massique et de la conductivité thermique. Rapport du contrat ADEME/CIRAD n° 0001068. — Montpellier : CIRAD-Forêt, 2003.
- ORMARSSON (S.), PETERSSON (H.), ERIKSSON (J.), DAHLBLOM (O.). — Improved Shape Stability of Timber Products Obtained by Use of a Numerical Simulation Technique. — 7th International IUFRO Wood Drying Conference, Tsukuba, Japan, 2001, pp. 312-317.
- PERRÉ (P.). — Approche cellulaire du matériau bois : passage de l'image réelle au calcul d'homogénéisation. *In* : colloque VIM 2001, Visualisation, image, modélisation. — *Récents Progrès en Génie des Procédés*, vol. 78, 2001, pp. 405-414.
- PERRÉ (P.). — Le Séchage convectif de bois résineux : choix, validation et utilisation d'un modèle. — Université Paris VII, 1987 (Thèse).
- PERRÉ (P.), coordinateur. — Amélioration des connaissances sur le traitement thermique du bois. Rapport du contrat ADEME/ENGREF/CIRAD n° 00 01 064. — Nancy : ENGREF-LERMAB, 2004.
- PERRÉ (P.), coordinateur. — Effets de la composition chimique, de l'ultra-structure et de la structure anatomique sur quelques propriétés de base du matériau bois. Rapport final des conventions DERF/ENGREF n° 01.40/30/96 et 01.40/33/98. — Nancy : ENGREF-LERMAB, 2004.
- PERRÉ (P.). — MeshPore : a software able to apply image-based meshing techniques to anisotropic and heterogeneous porous media. *In* : 14th International Drying Symposium, Drying'2004, Sao Paulo, Brazil, 2004, pp. 664-671.
- PERRÉ (P.), TURNER (I.). — TransPore : A Generic Heat and Mass Transfer Computational Model for Understanding and Visualising the Drying of Porous Media. Invited paper. — *Drying Technology Journal*, vol. 17, n° 7, 1999, pp. 1273-1289.
- RANTA-MAUNUS (A.). — The viscoelasticity of wood at varying moisture content. — *Wood Science and Technology*, n° 9, 1975, pp. 189-205.
- RÉMOND (R.). — Approche déterministe du séchage des avivés de résineux de fortes épaisseurs pour proposer des conduites industrielles adaptées. — ENGREF, 2004 (Thèse de Doctorat).
- ROUSSET (P.). — Choix et validation expérimentale d'un modèle de pyrolyse pour le bois traité par haute température : de la micro-particule au bois massif. — ENGREF, 2004 (Thèse de Doctorat).
- SANCHEZ-HUBERT (J.), SANCHEZ-PALENCIA (E.). — Introduction aux méthodes asymptotiques et à l'homogénéisation. — Paris : Masson, 1992.
- WHITAKER (S.). — Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media : A theory of drying. — *Advances in Heat Transfer*, n° 13, 1977, pp. 119-203.

DES AXES DE RECHERCHE PORTEURS D'ESPOIR POUR DEMAIN (Résumé)

Parmi les nombreux domaines de recherche porteurs d'espoir, ceux relatifs à la connaissance du matériau et de son comportement lors des premiers processus de transformation sont fondamentaux.

Cet article, dans une première partie, fait le point sur le niveau des recherches permettant de connaître certaines caractéristiques de la ressource forestière sur pied actuelle et de la ressource future, et, dans une seconde partie, montre les progrès rendus possibles grâce à l'approche déterministe et les possibilités qu'elle offre pour connaître et prédire à la fois certaines caractéristiques du matériau et son comportement lors de certains processus de transformation.

PROMISING AREAS OF RESEARCH (Abstract)

Among the many promising areas of research, those relating to knowledge of the material and its behaviour during the initial processing steps are fundamental.

Part 1 of this article reviews the quality of research relating to a number of characteristics of current standing timber and future forest resources. Part 2 describes the progress accomplished by means of a deterministic approach and the possibilities it offers to ascertain and predict both some of the features of the material and its behaviour when subjected to certain processes.