



HAL
open science

Analyse d'images et modélisation mathématique : deux outils pour comprendre et mieux utiliser le matériau bois

Patrick Perré

► **To cite this version:**

Patrick Perré. Analyse d'images et modélisation mathématique : deux outils pour comprendre et mieux utiliser le matériau bois. *Revue forestière française*, 1993, 45 (S), pp.166-178. 10.4267/2042/26483 . hal-03444156

HAL Id: hal-03444156

<https://hal.science/hal-03444156>

Submitted on 23 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.

ANALYSE D'IMAGES ET MODÉLISATION MATHÉMATIQUE : DEUX OUTILS POUR COMPRENDRE ET MIEUX UTILISER LE MATÉRIAU BOIS

P. PERRÉ

À la charnière entre forêt et industrie du bois, le domaine couvert par les sciences du bois est très vaste, donc forcément interdisciplinaire.

Dans un premier temps, il fut demandé à cette discipline de faire un énorme catalogue descriptif de toutes les essences utilisées ou utilisables par l'industrie. C'est pourquoi l'anatomie systématique et la caractérisation technologique sont deux symboles des sciences du bois.

Bien entendu, ces deux aspects restent d'actualité. Rappelons pour s'en convaincre que l'inventaire de la flore ligneuse des forêts tropicales humides est encore incomplet. La description, puis l'utilisation de nouvelles essences, dites essences secondaires, continue donc à justifier un important travail de caractérisation. De plus, certains procédés de transformation, emplois nouveaux ou mieux dimensionnés, font appel au comportement limite du matériau et nécessitent de nouvelles mesures (comportement viscoélastique, mécanosorptif, utilisation de températures élevées...).

Mais cette phase descriptive ne suffit plus. Chaque procédé de transformation (sciage, déroulage, tranchage, étuvage, collage, séchage, formage...) fait intervenir de façon plus ou moins prononcée l'origine biologique du matériau, l'histoire de son élaboration et la complexité de son comportement. Conjointement, outre l'amélioration de la production en volume, le sylviculteur souhaite connaître les conséquences de ses choix sur la qualité du matériau élaboré. La notion de qualité elle-même, liée aux nouvelles technologies et aux nouvelles utilisations, est évolutive.

Pour toutes ces raisons, nombre de travaux actuels essaient de renforcer le trait d'union entre forêt et matériau. À ce stade, nous mettons le doigt dans un engrenage dont quelques mots-clés soulignent la complexité : génétique, station, sylviculture, aubier, bois juvénile, contraintes de croissance, hétérogénéité, bois de réaction, anisotropie, déformations figées, fluage, mécanosorption, ...

Face à une telle complexité, le chercheur a de quoi être désemparé. Pour celui qui n'a pas renoncé, ce qui est déjà une preuve incontestable de courage, la manière d'aborder ces problèmes dépend fortement de sa formation. Schématiquement, deux profils peuvent se rencontrer : sciences du vivant et sciences de l'ingénieur (il paraît difficile, pour l'instant, de recruter des compétences de la physique théorique !).

Le chercheur issu du premier s'intéressera au fonctionnement de la plante (de la biologie moléculaire à la physiologie) ou à celui des peuplements (biométrie). Cette dernière se révèle très rapidement opérationnelle : les relations fortes extraites de mesures nombreuses conduisent à des modèles prédictifs souvent assez fiables. En revanche, les relations de causalité restent floues et les résultats ne sont pas exploitables pour d'autres essences ou d'autres conditions de production.

Le chercheur issu du deuxième profil essaiera de comprendre et d'expliquer les relations entre la structure du matériau et ses propriétés, puis d'associer ces propriétés pour accéder aux procédés. Le caractère explicatif des travaux et l'adaptation rapide de la méthode à d'autres configurations constituent ses principaux avantages. Il faut cependant noter les résultats parfois décevants des modèles de connaissance lorsqu'ils sont appliqués à des fins prédictives.

Les travaux relatés dans cet article sont motivés par la constatation suivante : au sein d'un cadre rigide appelé plan ligneux, l'anatomie d'un individu s'exprime différemment selon le génotype, la sylviculture, la vitesse de croissance, les besoins de réorientation, ... L'enjeu est de comprendre puis de prédire les changements de propriétés liés à ces modifications. Il s'agit d'une approche déterministe des propriétés du matériau.

Dans ce cadre, l'objectif est ici de donner au lecteur une idée des possibilités qu'offrent deux outils informatiques particulièrement utiles : le traitement d'images et la simulation numérique. Le texte se veut explicite et accessible à des non-spécialistes. Toutefois, souhaitant garder une certaine rigueur, il ne sera jamais simpliste et ne prétend pas être facile.

Les résultats présentés illustrent comment une simple observation de coupe anatomique permet d'obtenir le profil de densité intra-cerne (conséquence directe de la sylviculture et de la croissance) et le comportement au séchage qui en résulte.

L'ANALYSE D'IMAGES

Description de l'outil

Une chaîne d'acquisition et de traitement d'images comporte plusieurs éléments : la caméra et son optique, la carte d'acquisition et de numérisation, le logiciel de traitement et son ordinateur hôte (photo 1, ci-dessous).

Photo J.-C. MOSNIER

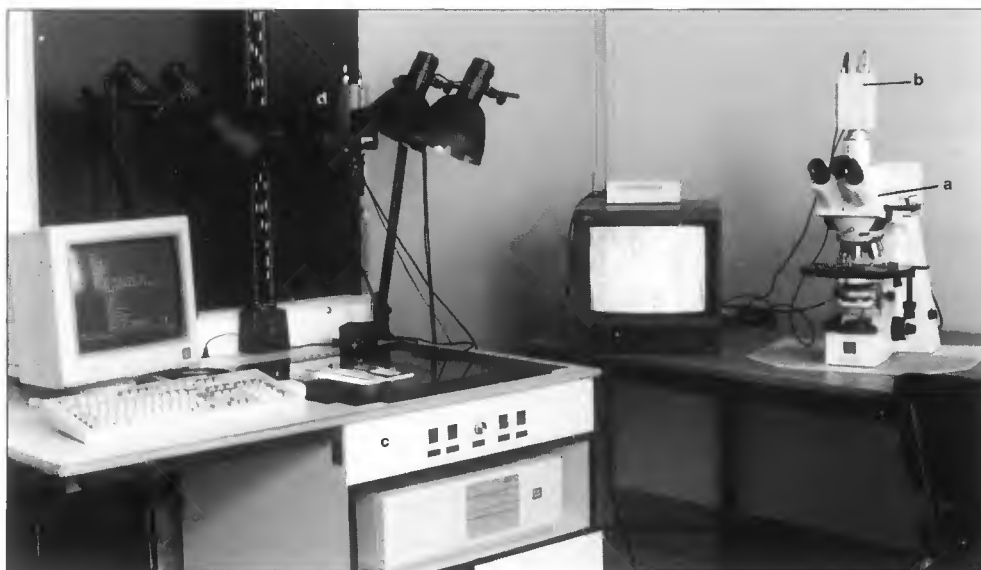


Photo 1 Vue générale de l'analyseur d'images
(a) microscope, (b) caméra, (c) micro-ordinateur muni d'une carte d'acquisition,
(d) support de caméra, spots et table lumineuse pour l'observation macroscopique

Afin de réaliser toutes les étapes de ce qui est appelé traitement d'images, il faut ajouter en amont le matériel nécessaire à la préparation des objets sources (radiographies, coupes micro-tomiques, bois massif poli, ...), et en aval l'ordinateur, amplement sollicité pour exploiter les résultats.

Les différentes séquences du traitement d'image représentent autant de compétences spécifiques :

- *Obtention de l'image initiale*

De cette première étape dépend la qualité du résultat final. Les mesures ne sont fiables et reproductibles qu'à condition que l'information contenue dans l'image initiale soit suffisante. Dans le domaine des sciences du bois, l'image est en général une vue fortement agrandie du matériau. Elle fait appel aux outils de base de l'anatomiste : microtome, polisseuse, loupe binoculaire et/ou microscope optique muni d'une caméra. La microscopie électronique n'est pas exclue. C'est sans conteste l'étape qui nécessite le plus de soin.

Après acquisition, l'image est numérisée. Il s'agit alors d'une grille (typiquement 512×512) dont chaque carreau (ou pixel) est caractérisé par son niveau de gris, également discrétisé (typiquement 256 niveaux répartis du noir au blanc).

- *Traitement de l'image*

Cette étape consiste à transformer l'image, puis à faire des mesures géométriques jusqu'à l'obtention de l'information quantitative désirée.

Le traitement utilise bien entendu les fonctions spécifiques de traitement d'images (Coster et Cherman, 1989). Le caractère automatique des procédures développées permet avant toute chose de s'affranchir de l'effet opérateur. Le gain de temps, souvent évoqué et toujours appréciable, n'est pas à chaque fois au rendez-vous : certains traitements peuvent prendre plusieurs heures, mais ils s'effectuent heureusement sans opérateur.

- *Exploitation des mesures*

Généralement, l'information prélevée sur l'image est d'ordre statistique (proportion de pixels ayant une propriété spécifique) ou morphologique (description des formes). Or, l'objectif final est d'un autre ordre. L'exploitation de cette information est indispensable avant d'obtenir le caractère souhaité : une propriété physique, une propriété mécanique, l'effet d'un traitement... Elle peut être très simple (voir paragraphe suivant), mais peut également faire appel à des théories élaborées (mécanique du solide déformable, techniques d'homogénéisation, minimisation de fonctionnelles, simulation numérique, ...).

Enfin, il ne faut pas oublier de valider une telle démarche. Les propriétés calculées par analyse d'images doivent être comparées à des mesures physiques. Mais ici, on sort de l'outil proprement dit pour aborder la stratégie scientifique.

Un exemple simple : la mesure de densité

La densité est un paramètre incontournable du matériau bois. Il explique une grande partie des propriétés mécaniques, une partie du retrait, de la durabilité, de la couleur...

Connaître la variation spatiale de ce paramètre est encore plus important : celle-ci constitue le point de départ des travaux qui visent à relier les conditions de production forestière (génotype,

Photo J.-C. MOSNIER

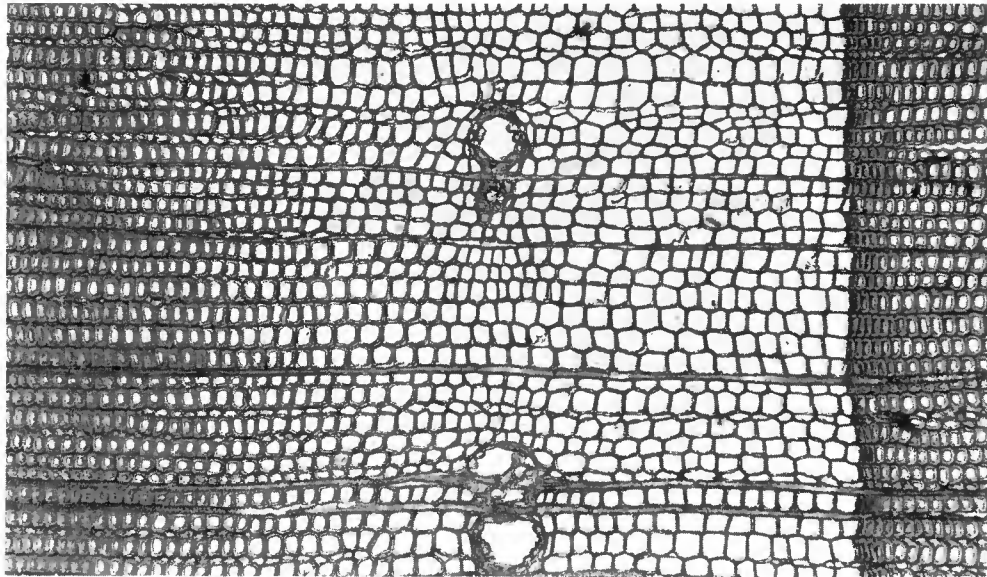


Photo 2 Coupe d'Epicéa observée au microscope (c'est le point de départ du traitement d'images)

station, sylviculture) et les propriétés du matériau. Les travaux faits dans ce sens à l'ERQB ⁽¹⁾ sont de notoriété internationale (Polge, 1966).

La mesure de densité du bois sur coupes anatomiques illustre, dans un cas simple, la démarche présentée au paragraphe précédent. Cette méthode n'est pas nouvelle (Sachsee, 1984) : elle consiste « simplement » à quantifier la fraction surfacique des parois cellulaires. La densité locale est obtenue en multipliant cette fraction, supposée égale à la fraction volumique, par la masse volumique de la matière ligneuse.

L'image provient d'une coupe anatomique observée au microscope. Sur ce type d'image, la séparation vide-paroi n'est fiable qu'au prix de multiples précautions :

- la faible profondeur de champ du microscope doit être compensée par la finesse des coupes. Celles qui sont utilisées sont préparées à l'ERQB par M^{me} Garros ; elles ont une épaisseur de 12 μ (photo 2, ci-dessus) ;
- le contraste vide-paroi est rehaussé par des filtres qui arrêtent la couleur complémentaire à la coloration des parois ;
- l'hétérogénéité de l'éclairage est corrigée à l'aide d'une image de référence.

L'image est alors composée de pixels plutôt foncés (parois), de pixels plutôt clairs (vides cellulaires) et de pixels « intermédiaires » qu'il faut attribuer à l'une des deux populations.

La difficulté est de mettre au point un traitement informatique qui fasse cette attribution de façon automatique. Nous utilisons une méthode basée sur l'entropie (au sens de l'information) qui présente des analogies avec la physique statistique. L'algorithme développé permet également de diviser l'image en plusieurs zones de façon à effectuer un balayage selon la direction radiale.

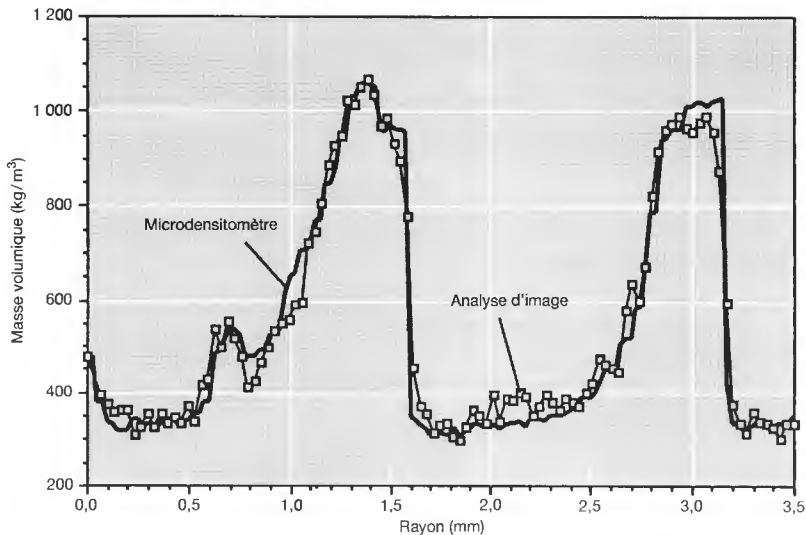
(1) ERQB : Equipe de Recherche sur la Qualité des Bois de l'Institut national de la Recherche agronomique (INRA) à Champeaux.

Comparée à la mesure effectuée par microdensitométrie (Polge, 1966), cette méthode se révèle satisfaisante (figure 1, ci-dessous). Le bruit visible sur la courbe peut être attribué à une trop faible largeur de mesure dans la direction tangentielle.

Remarque : Un petit pic est observé vers le milieu du premier accroissement annuel sur les deux courbes. La méthode utilisant l'anatomie quantitative nous apprend qu'il provient d'un canal résinifère.

En conclusion, cette mesure de densité locale donne de bons résultats. Elle n'équivaut pas, en précision, à la méthode désormais classique de microdensitométrie. Cependant, l'information recueillie n'est pas exactement équivalente. Ne donnant que la densité associée aux parois cellulaires, elle exclut la contribution des extractibles et des résines mesurée par gravimétrie ou par radiographie. De ce fait, elle peut conduire, par exemple, à uniformiser les corrélations densité-propriétés mécaniques obtenues pour différentes essences.

Figure 1 **COMPARAISON DES PROFILS DE DENSITÉ MESURÉS SUR UN ÉCHANTILLON D'ÉPICÉA**



La mesure par microdensitométrie est effectuée par l'ERQB (INRA) à partir de radiographies. L'autre courbe est obtenue par sélection automatique des parois cellulaires sur des coupes microscopiques (d'après Lahbabi, 1992)

Par ailleurs, l'analyse d'images peut donner beaucoup plus que la fraction surfacique des parois. En effet, la morphologie de la matrice poreuse est également connue ; elle ouvre de nombreux horizons : pression capillaire (cf § « Mesure de la pression capillaire par analyse d'images », p. 174), diffusion massique et thermique, propriétés mécaniques, retrait...

Bien entendu, l'exploitation des mesures (étape « Exploitation des mesures », p. 168) sera de plus en plus complexe.

LA MODÉLISATION MATHÉMATIQUE

Principe

Un modèle est une version abstraite et réduite de la réalité qui doit être capable de simulation. Après avoir retrouvé des résultats connus (validation), il permet de comprendre et de prédire les comportements d'un système.

Lorsque le modèle repose sur les lois de la physique, le formalisme mathématique qui en découle conduit souvent à un jeu d'équations aux dérivées partielles. Dans ce cas, la simulation de la réalité consiste à intégrer ces équations. Aussi, de nombreuses méthodes analytiques ont-elles été développées.

Cependant, aidées par l'essor de l'informatique, les mathématiques appliquées ont révolutionné les possibilités de simulation. Les méthodes numériques actuelles ne redoutent pas les géométries complexes, les équations non-linéaires, le couplage entre plusieurs variables, les conditions aux limites variées et variables...

Dans le cadre de l'étude d'un système physique hors de l'équilibre, l'évolution des variables d'état du système (température, teneur en eau, pression, vitesse, déplacement, ...) résulte des lois fondamentales de conservation globale de certaines grandeurs (énergie, masse, quantité de mouvement...).

Pour un volume donné, l'évolution des variables résulte du bilan des flux sur la surface de ce volume (figure 2a, ci-dessous). Pour la masse d'eau d'un échantillon de bois, par exemple, le bilan s'écrit à l'instant t :

$$\sum_i Q_i^{entrant} - \sum_i Q_i^{sortant} = \frac{\partial M}{\partial t} \quad (1)$$

Somme des flux entrant Somme des flux sortant Variation temporelle de la masse totale

La conservation de l'enthalpie (grandeur qui, sous certaines conditions, mesure l'énergie thermique du système) sera illustrée au paragraphe suivant. Il s'agit d'un exemple plus complexe puisqu'il faut prendre en considération à la fois les flux thermiques (conduction) et l'enthalpie transportée par les flux de masse (par exemple, liquide chaud qui pénètre dans un milieu froid).

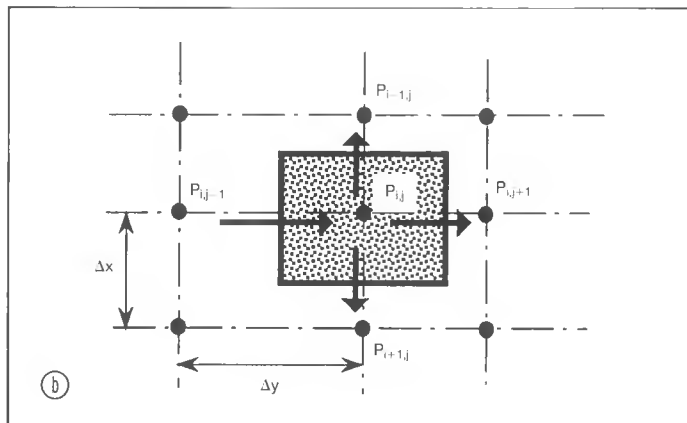
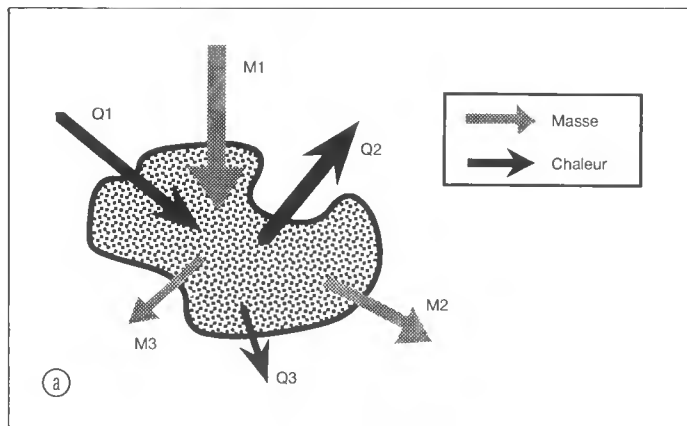


Figure 2
PRINCIPE DE CALCUL D'UNE LOI DE CONSERVATION.
 a) Sur un système considéré, de volume quelconque.
 b) Sur un volume élémentaire, à partir d'une discrétisation spatiale d'un milieu continu

La variation temporelle de l'enthalpie totale du système comporte non seulement la variation de température, mais aussi l'énergie nécessaire aux changements de phase éventuels (congélation, évaporation...).

Une méthode numérique particulièrement bien adaptée au traitement de ces équations de conservation est la méthode des volumes finis (Patankar, 1980).

Elle consiste à découper le domaine que l'on veut traiter en petits volumes élémentaires de forme géométrique simple (figure 2b, p. 171). Le bilan effectué sur chacun de ces volumes (équation 1) conduit à l'évolution temporelle de la valeur moyenne de la variable d'état concernée (par exemple la température) au sein du volume.

Cependant, contrairement au bilan effectué sur un volume quelconque (figure 2a, p. 171), la taille réduite des volumes utilisés dans le calcul numérique nous autorise à formuler des hypothèses simples sur l'évolution de chaque grandeur au sein du volume. Généralement, cette grandeur est supposée constante dans le volume ou ses variations entre deux volumes voisins sont supposées linéaires. Grâce à cette possibilité, nous obtenons un champ spatial approché pour chaque grandeur.

Notons que ce champ spatial est indispensable pour évaluer les flux intervenant dans le bilan. En effet, nombre de lois physiques expriment les flux en fonction de la force motrice, c'est-à-dire du gradient (variation spatiale) de la grandeur physique concernée : température pour la conduction de la chaleur (loi de Fourier), pression totale pour l'écoulement en milieu poreux (loi de Darcy), concentration pour la diffusion massique (loi de Fick), déformations pour les contraintes dans un solide (loi de Hooke), ...

Au passage, le lecteur aura pu remarquer que, pour connaître les flux nécessaires aux bilans, il faut connaître les variables, résultat de ces bilans ! Ce paradoxe est levé par la résolution de systèmes linéaires (inversion de matrices).

Tout calcul fait, le champ sera d'autant plus précis que le maillage est fin. Un compromis devra être recherché entre temps de calcul et précision.

Une application : l'avancée du front de gel dans un billon

La gélivure du Chêne est un défaut qui intervient pendant la vie de l'arbre lors des hivers particulièrement rigoureux. Du point de vue sylvicole, ce défaut est grave puisque les arbres gélivés sont fortement dépréciés. Sachant que la fréquence de tels hivers est de l'ordre de trente ans et qu'il faut plus de deux siècles pour faire un chêne de tranchage, il est facile de comprendre pourquoi l'ONF s'intéresse de près à ce phénomène.

Les fentes longitudinales occasionnées par le froid sont des défauts qui s'apparentent aux contraintes de séchage. En effet, la pression de vapeur saturante de la glace est inférieure à la pression de vapeur saturante de l'eau en surfusion. Ainsi, lorsque la sève brute gèle dans les vides cellulaires, un flux de vapeur diffuse à partir des parois cellulaires et se condense sur la glace présente dans les cellules. Il s'agit d'un retrait hydrique induit indirectement par la baisse de la température. Lorsque la teneur en eau est très importante, les vides cellulaires ne peuvent plus accepter l'augmentation du volume de l'eau lors du gel. On constate alors une expansion au gel (Cinotti, 1989).

La simulation de ce phénomène nécessite la connaissance du champ de température dans le billon au cours du temps. Ce dernier est obtenu par résolution numérique du bilan de conservation de l'enthalpie. Bien entendu, la chaleur latente de solidification de l'eau libre joue un grand rôle. Mais la simulation doit également tenir compte de la très grande conductivité thermique de la glace (près de quatre fois supérieure à celle de l'eau) (Perré, 1992).

La figure 3 montre l'évolution temporelle des températures obtenues par simulation pour différentes valeurs du rayon. La chaleur latente de solidification de l'eau libre est à l'origine des paliers que l'on peut observer à 0 °C. Pour chacun des rayons représentés, la chute vers les températures négatives n'a lieu qu'après le passage du front de congélation. Ces résultats concordent parfaitement avec l'expérience (Cinotti, 1989).

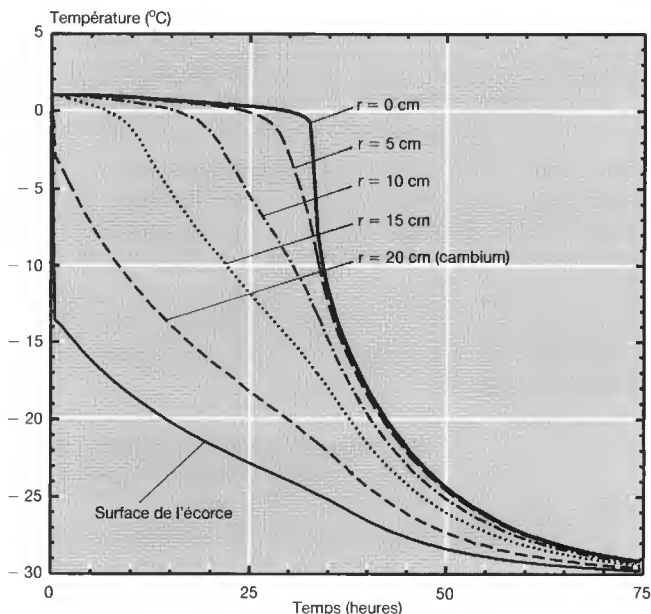


Figure 3
ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES À DIFFÉRENTS RAYONS D'UN BILLON SOUMIS AU FROID. Il s'agit de résultats de simulation (température initiale = 2 °C, infradensité = $560 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, teneur en eau = 85 %, température extérieure = -30 °C, coefficient d'échange $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, transferts longitudinaux négligés)

DE L'ANATOMIE AU SÉCHAGE, UN EXEMPLE CONCRET DE CHANGEMENT D'ÉCHELLE

Complémentarité de l'analyse d'images et de la simulation numérique

Comme beaucoup de milieux réels, le bois présente plusieurs échelles d'hétérogénéité : l'ultra-structure, les éléments du plan ligneux, les cernes annuels, le changement dû à la duraminisation. Chacune de ces échelles participe à l'expression macroscopique du matériau. Cependant, il est évident que sa modélisation ne peut conserver une description géométrique et physique aussi complexe. À chaque échelle, la description doit intégrer au mieux, vis-à-vis des phénomènes appréhendés, l'information relative aux échelles précédentes.

Lorsque l'on parle de milieu poreux, l'adjectif homogène (propriétés indépendantes de la position) signifie que le milieu peut être décrit par un jeu d'équations macroscopiques. Ici, nous caractériserons cette propriété par le terme « milieu homogénéisable ». Dans le cas du séchage, ces équations macroscopiques sont obtenues par prise de moyenne sur un volume « grand par rapport à la taille des pores ». Cependant, un tel milieu peut avoir ses propriétés macroscopiques qui varient dans l'espace : il devient macroscopiquement hétérogène.

Au niveau de ses strates de croissance annuelles, le bois répond parfaitement à cette définition. La modélisation mathématique ne peut prendre en compte ces variations qu'à la condition de connaître les propriétés nécessaires à chaque endroit de l'accroissement annuel. C'est à ce niveau que le recours à l'analyse d'images s'impose. Les deux paragraphes suivants montrent comment la pression capillaire mesurée sur coupes microscopiques permet de simuler les mécanismes de séchage à l'intérieur du cerne.

Mesure de la pression capillaire par analyse d'images

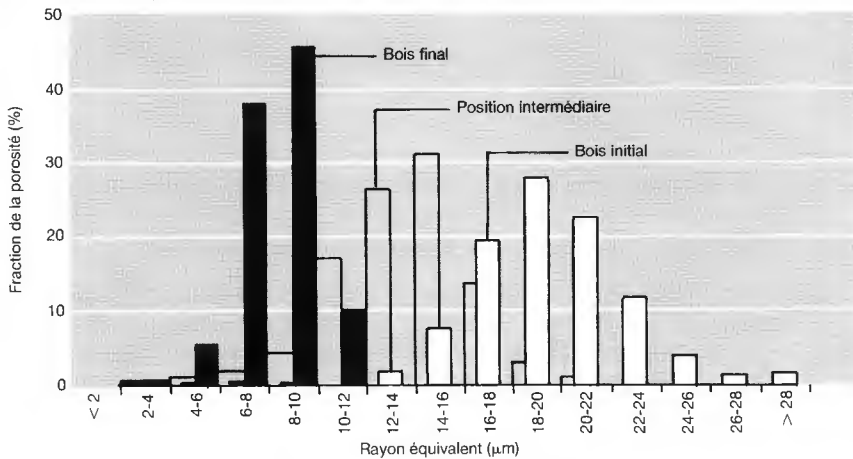
La mesure de densité par analyse d'images (p. 168) nous a appris à séparer les pixels en deux populations : parois et vides cellulaires. En analysant le deuxième groupe, il est facile d'obtenir, pour chaque pore, son diamètre équivalent et sa surface (photo 3, p. 177). La première information est liée à la pression capillaire, la seconde à la fraction de saturation concernée par cette pression. La figure 4 (ci-dessous) montre des histogrammes de taille de pores mesurés à différents endroits d'un accroissement annuel d'Épicéa. Pour chaque localisation, la pression capillaire est obtenue en fonction de la teneur en eau en supposant que la répartition spatiale du liquide minimise l'énergie. Sachant que l'énergie de l'eau est d'autant plus faible que le pore est petit, ceci revient à ordonner les pores par taille croissante ⁽²⁾.

Les courbes obtenues par ce procédé, relatives à la pression capillaire des sites, sont en bon accord avec les courbes obtenues par porosimétrie mercure sur des coupes très fines de 350 µ (Trénard, 1980). En revanche, elles sont très différentes de celles obtenues par le même auteur sur des échantillons épais. Ces dernières font intervenir une percolation de liaison.

Chacune de ces courbes a son importance pour modéliser le séchage : la première est bien adaptée à la migration liquide induite par les forces capillaires (séchage traditionnel) tandis que la deuxième s'impose lorsque le liquide est expulsé par surpression gazeuse (séchage à haute température, séchage micro-ondes).

Figure 4

HISTOGRAMMES DES DIAMÈTRES ÉQUIVALENTS DE PORES MESURÉS À TROIS ENDROITS D'UNE COUPE D'ÉPICÉA
(les densités à 12 % sont respectivement de 200, 500 et 800 kg · m⁻³)



Mécanismes de séchage à l'intérieur d'un cerne d'accroissement

À condition de prendre en considération les variations spatiales de propriétés, le jeu d'équations utilisé en séchage (Perré et Degiovanni, 1990) est apte à décrire les transferts dans un milieu hétérogène. Pour une essence donnée (plan ligneux fixé), il est supposé que les propriétés ne dépendent que de la densité.

Ainsi, la densité devient-elle une variable supplémentaire qui doit être prise en considération lors du développement des gradients en dérivées partielles. En l'absence d'effet de la pression de la

(2) Lorsque l'on remplit un milieu poreux par un fluide mouillant, les petits pores se remplissent en premier. Lors du séchage, opération inverse, ce sont d'abord les gros pores qui se vident.

phase gazeuse, la migration liquide dans le bois s'exprime à l'aide des forces capillaires uniquement :

$$\vec{q}_t = - \frac{K}{\mu_t} \text{grad}(-P_c) \quad (2)$$

Le gradient de pression capillaire s'exprime à partir des dérivées partielles :

$$P_c = P_c(X, T, \rho_0)$$

$$\text{donc } \vec{\text{grad}}(P_c) = \frac{\partial P_c}{\partial T} \vec{\text{grad}}(T) + \frac{\partial P_c}{\partial X} \vec{\text{grad}}(X) + \frac{\partial P_c}{\partial \rho_0} \vec{\text{grad}}(\rho_0) \quad (3)$$

Le troisième terme est, dans ce cas, primordial. C'est notamment grâce à lui que l'on peut retrouver sur les simulations (figure 5 ci-dessous) que les zones initiales (densité plus faible, pores plus gros) sont plus humides au départ mais sèchent en premier.

Ces profils de séchage sont beaucoup plus réalistes que ceux obtenus avec un milieu homogène. Ils sont conformes aux résultats expérimentaux de la littérature (Quéméré, 1982 ; Plumb *et al.*, 1984).

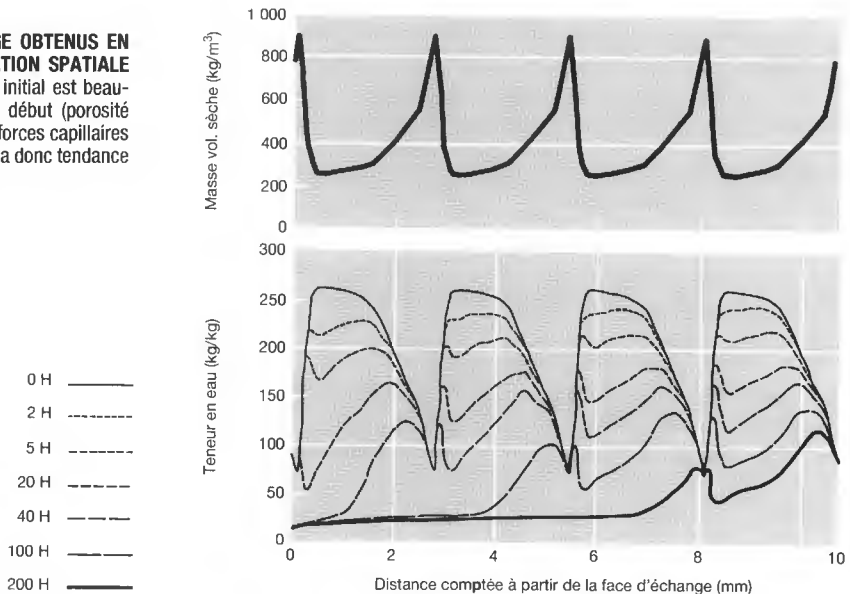
Même si elle n'est pas toujours utile, une description aussi fine de la structure, en transferts et en mécanique, est parfois indispensable :

- lors du séchage par chauffage micro-ondes, on constate expérimentalement que la migration liquide longitudinale a lieu essentiellement dans la zone de bois initial,
- chez le Douglas, des micro-fentes apparaissent souvent dans le bois initial,
- le temps caractéristique de la diffusion microscopique dépend fortement de l'épaisseur des parois...

Elle s'inscrit dans une volonté d'obtenir des modèles de connaissances de plus en plus riches, donc plus proches de la réalité (Perré et Martin, 1992).

Figure 5

PROFILS DE SÉCHAGE OBTENUS EN SIMULANT LA VARIATION SPATIALE DE DENSITÉ. Le bois initial est beaucoup plus humide au début (porosité plus élevée), mais les forces capillaires y sont moins fortes : il a donc tendance à sécher en premier



CONCLUSION ET PERSPECTIVES

À l'aide d'exemples simples et concrets, cet article a présenté deux outils informatiques utilisés en sciences du bois : l'analyse d'images et la simulation numérique. Du fait de leur complémentarité, ces outils seront de plus en plus employés pour tester le déterminisme des propriétés du bois :

- en analyse d'images, suite aux premiers résultats sur la densité et la pression capillaire, nos travaux portent actuellement sur la mesure du retrait, de propriétés mécaniques, de la diffusivité thermique et massique à partir de coupes microscopiques. Ces techniques permettront d'effectuer des mesures sur de très petites éprouvettes, voire de caractériser chaque élément du plan ligneux ;
- la simulation numérique est la clé du changement d'échelle pour certaines des propriétés qui viennent d'être citées : elle est indispensable pour calculer un retrait ou une diffusivité macroscopique à partir de données microscopiques. Au niveau macroscopique, c'est le seul outil capable de simuler des phénomènes complexes : prochainement, un calcul mécanique sera associé au code de séchage déjà opérationnel. L'ensemble sera capable de prédire les contraintes en fonction des conditions de séchage. Dans ce cas, il s'agit de comprendre comment l'ensemble des propriétés du matériau interagit durant le procédé. Des retombées sont attendues sur la conduite du séchage.

Placées dans un cadre plus général, analyse d'images et simulation numérique sont deux maillons au service d'un édifice conceptuel visant à emboîter plusieurs échelles d'observation. Le terme échelle est ici entendu au sens large : il s'agit de la conjugaison entre une dimension et un moyen d'observation (biologie, structure moléculaire, morphologie cellulaire, propriétés macroscopiques, lots de pièces, procédé). Cheminer à travers toutes ces échelles exige de nombreuses compétences. Hormis quelques lacunes (physico-chimie, physique statistique, thermodynamique), la plupart des disciplines requises existe dans les organismes français travaillant sur le bois et la forêt. Encore faut-il que la collaboration interdisciplinaire soit effective.

Les approches statistiques et déterministes, par exemple, sont souvent mises en opposition. Pourtant, des fortes complémentarités existent :

- la masse d'information collectée par la première constitue la source d'inspiration de la seconde,
- les relations de causalité dégagées par l'approche déterministe peut aider le statisticien à choisir des variables et des mesures pertinentes.

Mais demain, le développement des outils informatiques permettra de réaliser des mesures de plus en plus complexes sur un grand nombre d'échantillons : la frontière entre statistique et déterminisme sera de plus en plus floue...

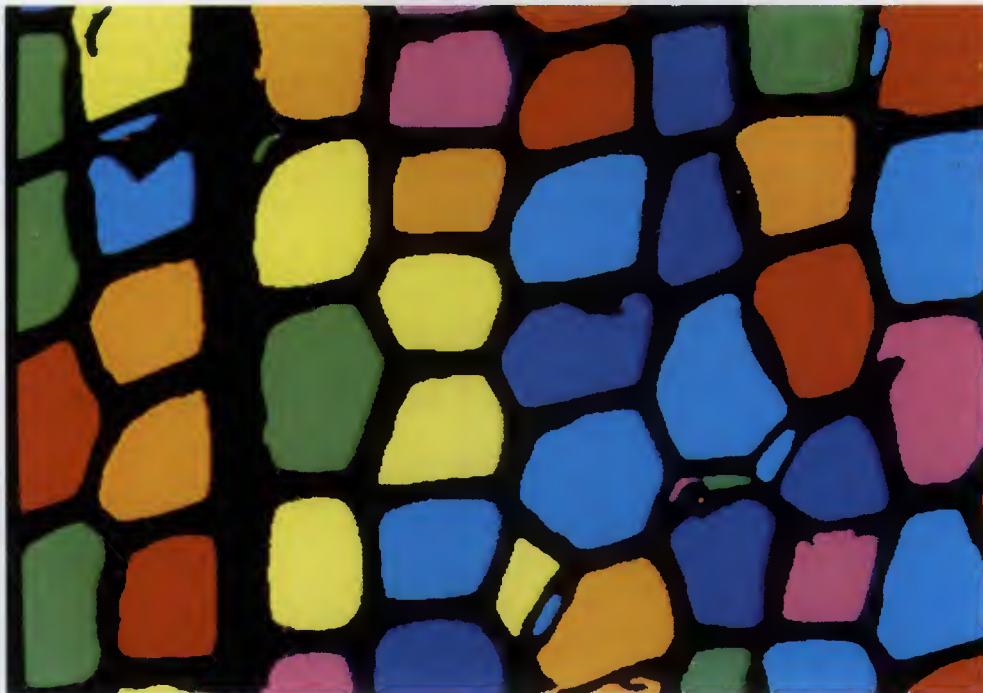
Par une collaboration active avec le LEMTA⁽³⁾ et l'ERQB, l'unité Produits forestiers du LRSF⁽⁴⁾ tente d'apporter sa modeste contribution à cette évolution.

Mais qu'en est-il de l'homme de terrain ?

Bien entendu, les connaissances acquises par ces outils participent à l'élaboration des connaissances sur le bois, et par ce biais, auront des retombées sur l'utilisateur, principalement sous la forme de règles de conduite ou d'abaques (sylviculture, séchage, déroulage, dimensionnement

(3) LEMTA : Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique théorique et appliquée associé au département Sciences pour l'Ingénieur du CNRS (Vandœuvre).

(4) LRSF : Laboratoire de Recherches en Sciences forestières de l'ENGREF (Nancy).



a

Photos J.-C. MOSNIER



b

Photo 3 Les pores d'une coupe d'Épicéa après seuillage et numérotation des entités binaires connexes (a - bois initial, b - bois final).
A ce stade, chaque vide cellulaire est un objet sur lequel sont effectuées des mesures géométriques

de structures...). Les outils eux-mêmes suivent de près : la télédétection est déjà une aide à la gestion et à l'aménagement. L'industrie vit la montée en puissance de l'informatique sur ses unités de production (détection de défaut, optimisation de débit par analyse d'images, séchage piloté par ordinateur...).

Même les équipements encore cantonnés au laboratoire finiront par en sortir. Il n'est plus utopique d'imaginer des micro-ordinateurs portables munis d'appareils photo-numériques, qui pourront, sur le terrain, mesurer ou assister la mesure de paramètres géométriques (sections, hauteurs, couverts végétaux...).

P. PERRÉ
Unité Produits forestiers
Laboratoire de Recherches en Sciences forestières
ÉCOLE NATIONALE DU GÉNIE RURAL,
DES EAUX ET DES FORÊTS
14, rue Girardet
54042 NANCY CEDEX

BIBLIOGRAPHIE

- CINOTTI (B.). — La Gélivure des Chênes : front de gel source de contraintes internes, incidence des propriétés anatomiques et mécano-physiques. — Nancy : ENGREF, INPL, INRA, 1989 (Thèse de Doctorat en Sciences du Bois).
- COSTER (M.C.), CHERMAN (J.-L.). — Précis d'analyse d'images. — Éditions du CNRS, 1989.
- LAHBABI (R.). — L'Anatomie quantitative pour une approche déterministe des propriétés du bois. — Nancy : ENGREF, 1992 (Rapport d'avancement de thèse).
- PATANKAR (S.V.). — Numerical heat transfer and fluid flow. — Hemisphere Publishing Corporation ; Mac Graw Hill Company, 1980.
- PERRÉ (P.). — Transferts couplés en milieux poreux non saturés : possibilités et limitations de la formulation macroscopique. — Nancy : INPL, 1992 (Mémoire d'habilitation à diriger des recherches).
- PERRÉ (P.), DEGIOVANNI (A.). — Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes : séchage du bois à basse et à haute température. — *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, vol. 33, n° 11, 1990, pp. 2463-2478.
- PERRÉ (P.), MARTIN (M.). — Understanding the drying at high temperature of sapwood and heartwood to improve kiln control. In : 3rd IUFRO International Wood Drying Conference, Vienne (Austria), August 1992, pp. 187-195.
- PLUMB (O.A.), BROWN (C.A.), OLMSTEAD (B.A.). — Experimental measurements of heat and mass transfer during convective drying of southern pine. — *Wood Science Technology*, vol. 18, 1984, pp. 187-204.
- POLGE (H.). — Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 23, n° 1, 1966 (Thèse d'État).
- QUEMERE (Y.). — Mesure ponctuelle de l'humidité du bois. — *Holzforschung*, vol. 36, n° 6, 1982, pp. 287-294.
- SACHSEE (H.). — Zur Dichtebestimmung von Hölzern mittels mikroskopischer Linearanalyse. — *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 42, 1984, pp. 121-129.
- TRENARD (Y.). — Comparaison et interprétation de courbes obtenues par porosimétrie au mercure sur diverses essences de bois. — *Holzforschung*, vol. 34, 1980, pp. 139-146.