

# MODÉLISATION DES DÉFORMATIONS DES PIÈCES DE BOIS AU SÉCHAGE ET INFLUENCE DE LA STRUCTURE INTERNE DE L'ARBRE

T. CONSTANT

Actuellement, de nombreux travaux de recherche sur la modélisation de la croissance des arbres sont en cours comme en attestent les articles de ce numéro spécial. Le but des outils de simulation mis au point dans ce cadre est de fournir une aide aux gestionnaires de nos forêts dans l'évaluation présente et future de la ressource. En aval de cette phase de gestion se trouve l'industriel qui recherche une matière première répondant à ses objectifs de qualité. Dans nombre de domaines d'utilisation, la qualité est étroitement associée aux performances mécaniques dont la densité et la nodosité sont des marqueurs importants, et de nos jours le forestier est de plus en plus sensibilisé à ces facteurs. Mais, une autre part importante de la qualité du produit, plus complexe à apprécier, réside dans les déformations des pièces de bois lors du séchage qui vont entraîner des pertes économiques importantes dans le processus de transformation, et des difficultés dans l'emploi des pièces.

Il apparaît donc important de bien comprendre les différentes causes responsables des déformations d'une pièce de bois, de les analyser afin de pouvoir en maîtriser les conséquences par un processus adapté. L'état de déformation d'une pièce de bois est le reflet d'un processus complexe qui doit prendre en compte une variabilité naturelle des caractéristiques du matériau (à l'échelle de l'espèce, mais aussi de l'arbre, de la planche, du cerne d'accroissement annuel voire de l'élément anatomique), qui agit sur l'ensemble des mécanismes impliqués. Si les retraits dans les directions naturelles du matériau représentent des éléments conséquents indubitables, d'autres caractéristiques en font également partie comme l'angle du fil par rapport aux directions de la pièce de bois (flexuosité d'une grume, fibre torse, plan de débit) ou encore la courbure des cernes (une dosse tire à cœur). Mais d'autres caractéristiques sont également responsables d'effets non moindres dont l'ampleur est souvent liée au mode de séchage (conventionnel, haute température, sous vide). On retrouve dans cette catégorie tous les paramètres qui régissent les lois physiques intervenant dans la migration de l'eau et de la vapeur (coefficient de perméabilité, de diffusions massique et thermique) et qui conduisent aux évolutions spatiales et temporelles de l'humidité et de la température au sein du matériau. Ce dernier point n'est pas sans conséquence quand on sait l'influence de ces deux grandeurs d'état sur le comportement mécanique du bois. En outre, la détermination de ces propriétés est souvent délicate et pose de nombreux problèmes métrologiques.

## DESCRIPTION DU LOGICIEL

Devant la complexité du phénomène à modéliser, et face à la volonté de poursuivre la démarche entreprise par les modélisateurs de la croissance vers des critères de qualité, un logiciel de simulation de déformation de pièces de bois au séchage a été développé en vue de permettre un premier pas vers cet objectif. Après une description des hypothèses menées dans la construction du logiciel, une illustration des différentes possibilités d'utilisation du logiciel sera donnée.

Ce logiciel utilisant la méthode des éléments finis permet de calculer les déformations d'une pièce de bois tridimensionnelle à partir de différentes informations dont une grande part décrit la croissance de l'arbre dans lequel la grume puis la planche est débitée. En d'autres termes, à différentes hauteurs, la distribution radiale des cernes est connue en supposant ces derniers concentriques et, par conséquent, la grume "numérique" est un empilement de troncs de cônes. Les grandeurs caractéristiques de la croissance, par exemple la largeur de cerne et l'âge compté à partir de la moelle, sont estimées aux hauteurs intermédiaires par une interpolation où le défilement de la tige est pris en compte. Ainsi la pièce de bois considérée est décrite en tout point par les deux variables précédentes. Cette information liée à la croissance de l'arbre peut provenir de mesures expérimentales ou d'une simulation de croissance (cf. articles Dhôte, p. 106 et Leban, p. 131).

La description précédente permet d'estimer ensuite les propriétés nécessaires au calcul par l'intermédiaire d'expressions correspondant à des ajustements établis à partir de mesures expérimentales. Dans l'état actuel, les propriétés prises en compte dans le calcul sont les coefficients de retraits dans les trois directions d'orthotropie et l'angle du fil du bois dans le plan longitudinal-tangentiel mesuré par rapport à l'axe de la tige. Toutes ces propriétés sont réévaluées au niveau local dans le repère attaché à la pièce de bois, en tenant compte de la courbure des cernes et de la direction longitudinale de la pièce par rapport à l'axe de la grume. Des variations locales supplémentaires dues à la présence d'un nœud par exemple sont envisageables dans le plan longitudinal-radial mais ne sont pas mises à profit du fait de l'hypothèse d'absence de nodosité admise ici dans une première étape en raison de la méconnaissance des propriétés au voisinage des nœuds.

Le calcul repose sur une formulation variationnelle de l'équilibre du solide. Dans l'état actuel, on suppose que l'écart d'humidité est uniforme en tout point de la pièce. Ceci a pour principale conséquence de rendre la vérification des équations de compatibilité cinématique triviale et entraîne l'inexistence de contraintes au sein du matériau. De ce fait, la loi de comportement du matériau n'a pas d'effet. Ces hypothèses simplificatrices sont rendues nécessaires pour des raisons matérielles (logiciel, temps de calcul...), mais aussi théoriques (connaissance du champ d'humidité, de la loi de comportement).

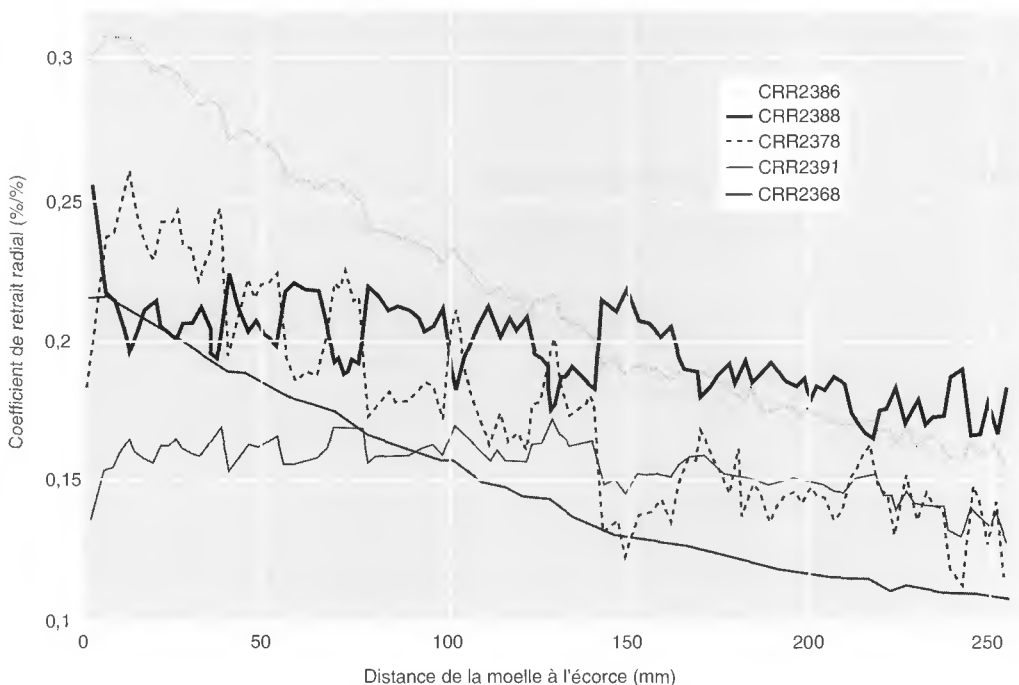
Sans avoir la vocation de devenir un logiciel commercial, une certaine convivialité existe afin de faciliter l'exploitabilité et la manipulation du logiciel :

- le choix sur une liste d'arbres des différentes combinaisons de propriétés de base modélisées en fonction de grandeurs de croissance et obtenues par ailleurs,
- le choix de la structure géométrique de la grume à partir d'une liste des arbres disponibles sous la forme de fichiers décrivant pour différentes hauteurs l'empilement des cernes,
- le calcul automatique d'un plan de débit dans une section utilisant différents modes de débit en plots, sur quartiers et sur maille avec mémorisation de la liste des planches et la sélection d'un ensemble de pièces parmi la liste proposée,
- l'enchaînement des calculs pour toute une liste de planches provenant d'une même grume et permettant de générer une population de pièces de bois de localisations différentes dans la section de la grume,
- la visualisation d'isovaleurs pour différentes grandeurs à l'échelle de la grume ou de la pièce de bois.

Malgré un calcul reposant sur des hypothèses simples, la description de l'objet a l'avantage de se faire à l'échelle du groupe de cerne et doit permettre des comparaisons qualitatives sur les déformations des pièces, induites par des conditions de croissance différentes ou par des effets individuels marqués. Dans sa forme actuelle, le logiciel peut permettre d'étudier l'interaction de différentes grandeurs toutes choses égales par ailleurs.

Par exemple, la figure 1 (ci-dessous) met en évidence le fort effet individuel sur le coefficient de retrait radial dans le cas du Chêne sessile (*Quercus petraea*) pour cinq arbres différents comparés dans les mêmes conditions de croissance. Les courbes présentées sont construites à partir d'ajustements provenant de mesures de retrait radial réalisées au niveau individuel mais appliquées à la même distribution radiale de cerne d'accroissement. Cette variabilité se retrouve sur d'autres paramètres tel que l'angle du fil. Quelles sont les conséquences de cette variabilité notamment inter-arbre sur les déformations à l'échelle d'une planche ? Quelles associations existent entre les différents paramètres du point de vue de la variabilité constatée sur chacun d'eux pour un même arbre ? Voici autant de questions pour lesquelles cet outil numérique se révèle utile pour tester des hypothèses à l'échelle du produit.

Figure 1 **ÉVOLUTION DU CŒUR VERS L'ÉCORCE DU COEFFICIENT DE RETRAIT RADIAL**  
 exprimé en % par % de teneur en eau à partir d'ajustements obtenus pour cinq Chênes sessiles  
 différents mais appliqués à une même distribution de cerne d'accroissement annuels  
 obtenue expérimentalement



D'autre part, les retraits et l'angle du fil sont des facteurs influant de façon notable les déformations. Dans une approche statistique, ces deux grandeurs sont assez fortement expliquées par l'âge compté à partir de la moelle comme l'illustrent les figures 2 et 3 (p. 144), en prenant comme exemple les ajustements obtenus pour le coefficient de retrait tangentiel et l'angle du fil dans le plan longitudinal-tangentiel de la grume. Notons encore une fois au passage la variabilité inter-individuelle rencontrée

Figure 2

**ÉVOLUTION D'AJUSTEMENTS DE L'ANGLE DU FIL**  
 mesuré dans le plan longitudinal-tangentiel en fonction de l'âge compté depuis la moelle  
 pour un arbre moyen d'une population, et pour deux extrêmes  
 l'un maximisant et l'autre minimisant les déformations

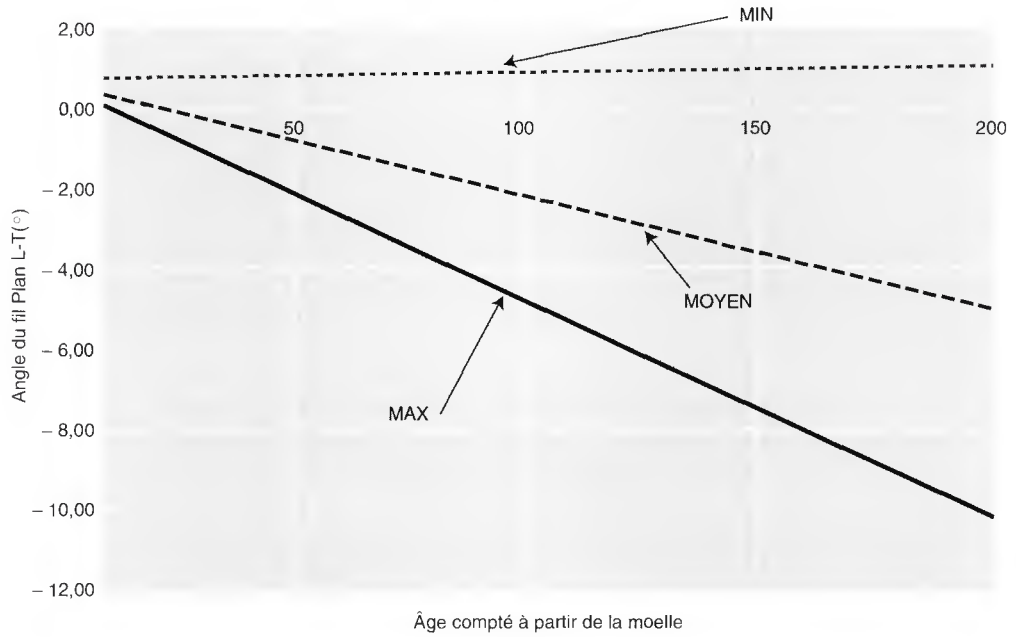
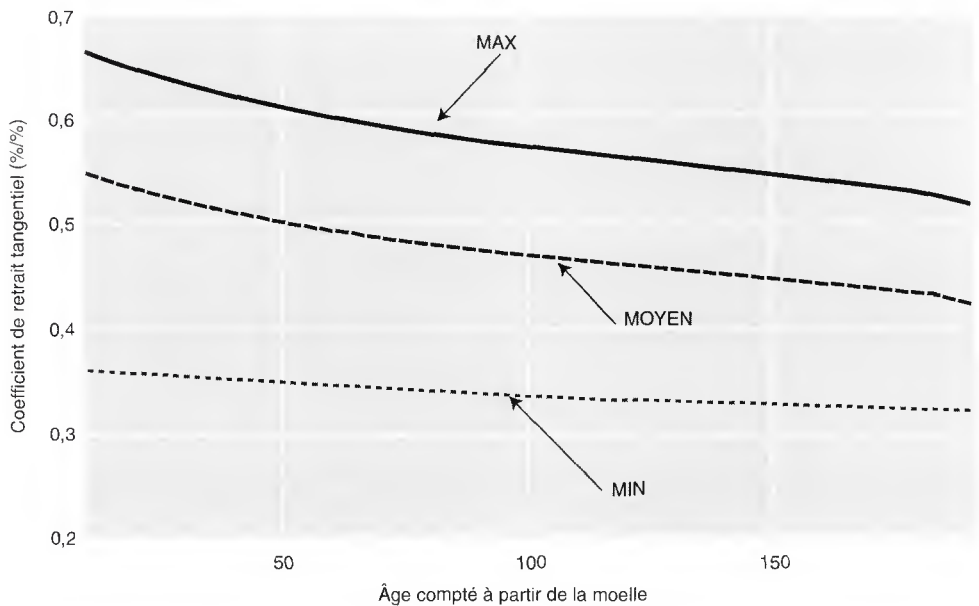


Figure 3

**ÉVOLUTION D'AJUSTEMENTS DU COEFFICIENT DE RETRAIT TANGENTIEL**  
 exprimé en % par % de teneur en eau en fonction de l'âge compté depuis la moelle  
 pour un arbre moyen d'une population, et pour deux extrêmes  
 l'un maximisant et l'autre minimisant les déformations



## Réalisations

pour ces deux caractères. Une tendance commune existe cependant : si l'angle du fil a tendance à croître en valeur absolue avec l'âge, le second montre une tendance opposée. De telle sorte que si l'on veut étudier l'effet d'une sylviculture dynamique comparée à une sylviculture plus traditionnelle menant à une grume de même diamètre mais d'âge moindre, un raisonnement conduit uniquement à partir des coefficients de retrait conclut à un retrait plus important dans le cas d'une croissance rapide. Mais une pré-étude utilisant le logiciel semble montrer que, dans ce cas, la déformation se révèle moins importante du fait d'une compensation de l'augmentation du retrait par une diminution de la valeur absolue de l'angle. Ainsi, si les déformations sont quantifiées par un ratio évaluant le pourcentage de pertes en volume de matière consécutives à une diminution de la teneur en eau de 20 % en dessous du point de saturation des fibres pour obtenir une pièce de géométrie parallélépipédique, les différences constatées pour les deux types de sylviculture peuvent atteindre 4 % suivant la localisation de la pièce et le type d'arbre pris en compte (tableau I). En outre, si l'on s'intéresse à l'effet de la variabilité entre arbres pour une planche, des écarts importants du ratio précédemment défini sont constatés entre les différentes combinaisons de paramètres affiliées respectivement à un arbre qualifié de moyen représentant une population, et à deux extrêmes l'un minimisant les déformations (Min) et l'autre les maximisant (Max) (tableau I ; figures 2 et 3).

Tableau I **Tableau de comparaison du ratio de pertes en volume dues au rabotage**  
pour corriger la déformation d'une planche  
simulée dans deux conditions de croissance différentes menant à une grume de même diamètre  
et pour trois combinaisons de paramètres influant les déformations au séchage

|                                   | Moyen  | Min.  | Max.   |
|-----------------------------------|--------|-------|--------|
| Sylviculture dynamique .....      | 13,5 % | 8,5 % | 16,0 % |
| Sylviculture traditionnelle ..... | 17,0 % | 8,5 % | 20,0 % |

Ainsi, les pertes au rabotage pour corriger les déformations s'étendent de 8,5 % à 20 % pour des planches localisées de façon identique dans les grumes simulées, et la réponse au type de sylviculture diffère selon l'arbre concerné.

Dans cette démarche, il apparaît nécessaire de pouvoir apprécier la qualité des prédictions en les comparant à des mesures expérimentales. Cette opération est en cours et peut conduire à une révision des hypothèses actuellement menées, afin de mieux appréhender la complexité du problème posé. Mais, on se heurtera alors à un autre écueil : la caractérisation des différents phénomènes couplés de transfert de chaleur et de masse et du comportement rhéologique. C'est une affaire à suivre...

Th. CONSTANT  
Équipe de Recherches sur la Qualité des Bois  
INRA  
F-54280 CHAMPENOUX