



**HAL**  
open science

## Les contraintes de croissance et le hêtre: état des connaissances et perspectives

Thierry Constant, Gérard Nepveu, G. Becker

► **To cite this version:**

Thierry Constant, Gérard Nepveu, G. Becker. Les contraintes de croissance et le hêtre: état des connaissances et perspectives. Rendez-vous Techniques de l'ONF, 2007, sp., pp.76-84. hal-01195038

**HAL Id: hal-01195038**

**<https://hal.science/hal-01195038>**

Submitted on 30 May 2020

**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.

## Les contraintes de croissance et le hêtre : état des connaissances et perspectives

*Mieux gérer la qualité du hêtre c'est aussi mieux comprendre les mécanismes à l'origine des contraintes de croissance des arbres en développement. Ces contraintes sont délicates à appréhender par le forestier. En l'état des connaissances actuelles, les auteurs de cet article conseillent de maintenir un faible niveau de concurrence entre les houppiers des arbres. Reste à traiter le cas des futaies irrégulières pour lesquelles les relations semblent plus complexes. Les travaux en cours devraient permettre une avancée importante sur ce sujet.*

La notion de qualité d'un arbre sur pied intègre beaucoup de critères plus ou moins accessibles au forestier. Les plus visibles, dont on saisit immédiatement l'impact sur la transformation (rendement, altérations...) sont la forme de la tige et la branchaison, en particulier la fourchaison dans le cas du hêtre. D'autres sont liés ou pas à des problèmes phytosanitaires et/ou climatiques, et peuvent demander un examen plus attentif : blessure d'exploitation, coup de chalumeau, chancre, maladie du T... Ils sont parfois lourds de conséquences comme nous le rappelle l'épisode récent dans les Ardennes suite à un froid précoce en 1998.

Cet article aborde plutôt la qualité « interne » du bois de hêtre selon des critères difficiles à apprécier de l'extérieur. Cette acception de la qualité du bois comporte différents aspects selon l'usage auquel il est destiné.

Malgré sa densité assez élevée (en moyenne 0,7 à 12 % de teneur en eau), le bois de hêtre est assez fragile d'où son emploi limité en charpente ou en bois de mine. Sa faible durabilité, dont témoigne sa conservation délicate une fois abattu, en interdit l'emploi en extérieur sans traitement. En revanche le bois de hêtre est un bois homogène à pores

diffus du fait de sa structure anatomique (figure 1), ce qui lui confère une bonne aptitude à la tournerie et à l'usinage en général. Actuellement la couleur claire est particulièrement recherchée pour les utilisations à forte valeur ajoutée où l'esthétique prime (placage, décoration, ameublement). Cela amène naturellement à considérer le cœur rouge du

hêtre comme un des premiers critères extérieurement invisibles de dépréciation de la qualité, en raison de son impact économique alors même qu'il ne modifie pas vraiment les propriétés du bois. Nous ne développerons pas plus avant ce point compte tenu de l'article qui lui est dédié dans ce volume.

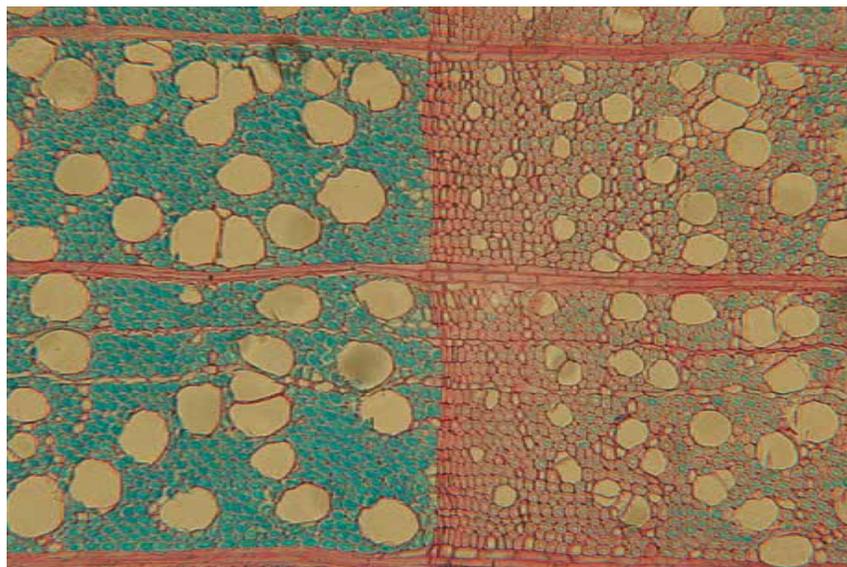


Fig. 1: coupe microscopique de bois de hêtre colorée au bleu-astra et à la safranine

De droite à gauche on voit la fin d'un cerne et le début du suivant : noter la répartition assez homogène (diffuse) des vaisseaux et leur taille plus importante au début du cerne qu'à la fin. Dans le cerne de droite, les lumens des cellules sont de moins en moins occupés par la couche gélatineuse G, riche en cellulose (colorée en bleu) jusqu'à la fin de la saison de végétation ce qui peut signifier que les stimuli responsables de la création du bois de tension ont disparu progressivement. En revanche, dès le début du cerne suivant, toutes les cellules, hormis les rayons ligneux, sont caractéristiques du bois de tension, et cette apparition brutale évoquerait plutôt une réaction consécutive à un déchaussement pendant la période hivernale.

P. Gelclaye, INRA

C'est à l'autre principal critère caché de dépréciation du bois de hêtre que nous nous intéressons ici : les contraintes de croissance qui se révèlent au moment de l'abattage par l'apparition de fentes en étoile partant du cœur.

L'analyse du développement des contraintes de croissance dans les arbres et de leurs conséquences technologiques est un champ de recherche qui a démarré dès le premier tiers du siècle dernier, et qui reste toujours d'actualité en dépit des progrès faits dans la connaissance du phénomène. Les essences feuillues à croissance rapide et cultivées en plantation à grand écartement, comme l'eucalyptus ou le peuplier, bénéficient toujours d'efforts assez soutenus du fait de leur poids économique mais aussi de leur mode de culture où le sylviculteur peut plus facilement maîtriser l'itinéraire qui va de la sélection des plants à la récolte, et mettre en application des techniques ayant fait leurs preuves.

Sans parler des essences tropicales de forêt naturelle qui se situent à un autre extrême, le contexte forestier du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) qui nous intéresse ici, amène des questionnements de nature sensiblement différente. L'éclaircie est ici le

principal outil dont dispose le sylviculteur pour atteindre ses objectifs d'exploitabilité en volume et qualité ; au nombre de ses interrogations, et sans prétendre à l'exhaustivité, se trouvent donc celles-ci :

- est-il possible de maîtriser par des actions ponctuelles dans le temps le développement excessif de contraintes de croissance ?
- Comment identifier les tiges sur lesquelles faire porter les efforts de correction ?
- Dans le cas d'un peuplement irrégulier, les niveaux de contraintes ne vont-ils pas avoir tendance à augmenter par rapport à un peuplement régulier ?
- Jusqu'à quel degré peut-on espérer récupérer une tige mal conformée en agissant en sa faveur, sachant qu'elle sera susceptible de développer des contraintes importantes, et pour quel résultat final ?

Ces questions sont légitimes et pour tenter d'y répondre cet article se propose de faire le point sur les connaissances disponibles et les travaux en cours sur les contraintes de croissance dans le hêtre. Il se décompose en trois parties principales. Il expose d'abord des notions de base sur les problèmes engendrés par les contraintes de croissance, leurs origines et leur évaluation. Ensuite, il

présente une synthèse des connaissances sur la liaison avec la sylviculture. Et pour finir il donne un aperçu de la démarche entreprise dans notre laboratoire pour faire progresser ces connaissances.

### Les contraintes de croissance : origines et conséquences

#### Définition

D'un point de vue mécanique, une contrainte est l'équivalent d'une pression soit une force, un poids par exemple, appliqué sur une certaine surface. L'unité usuelle est le MégaPascal (MPa). Pour fixer les idées, 1 MégaPascal correspond à la contrainte générée par une masse de 10 kg reposant sur 1 cm<sup>2</sup>.

#### Les contraintes de croissance sont d'abord un atout pour l'arbre...

Les contraintes de croissance sont de nature tridimensionnelle (directions radiale, tangentielle et longitudinale), et expriment que tout point du bois d'un arbre est soumis à des efforts de tension ou de compression qui dépendent de sa position dans la tige comme on peut le voir sur la figure 2. C'est surtout dans la direction longitudinale que leur intensité est importante.

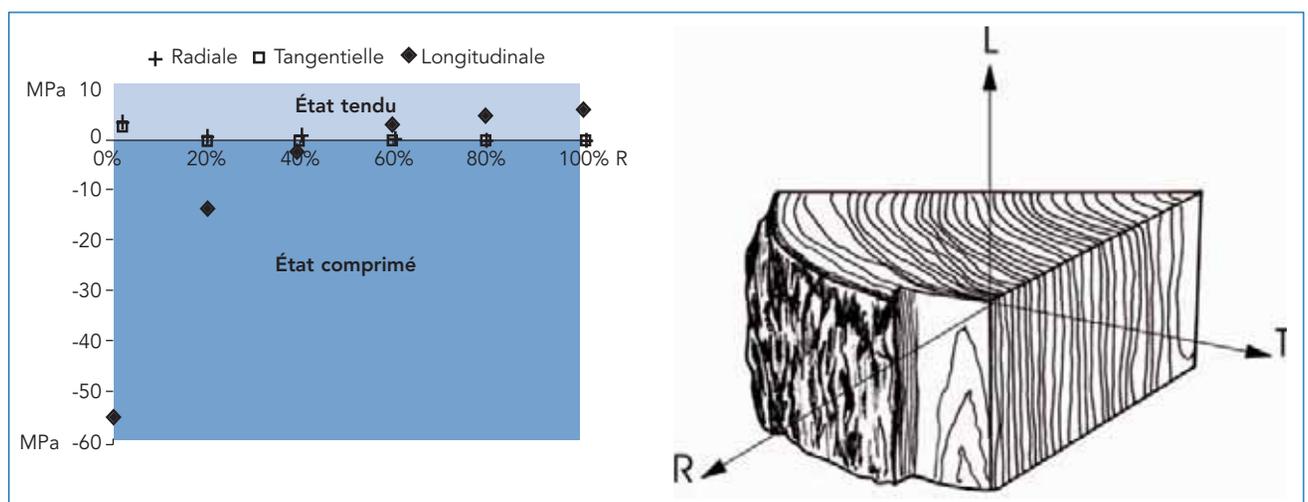


Fig. 2 : Distribution caractéristique des contraintes le long du rayon R d'un tronc en fonction de la direction selon laquelle s'exercent les contraintes

Les valeurs ont été obtenues par simulation d'après Fournier (1991b). On notera l'importance des valeurs de contraintes longitudinales (ou axiales) comparée à celles des directions radiale et tangentielle et comment les contraintes longitudinales passent d'un état de tension en périphérie du tronc à un état très marqué de compression à cœur.

Les contraintes de croissance résultent de deux origines :

- d'une part, la pesanteur : l'effet de la gravité sur la masse de l'arbre répartie dans l'espace engendre des contraintes de support d'une manière assez passive (Fournier et al. 1991a) ;

- d'autre part, la maturation cellulaire : ce mécanisme physiologique subi par les cellules nouvellement créées par le cambium génère, par un phénomène de rétraction, des contraintes dites « de maturation » qui sont le moteur principal utilisé par la plante pour faire évoluer la forme de sa tige ou de ses branches à travers des différences d'intensité de contraintes sur leur pourtour (Fournier et al. 1991b).

La distribution caractéristique des contraintes de croissance le long du rayon du tronc est présentée sur la figure 2. Les fortes valeurs de compression longitudinale au cœur de la tige s'expliquent par un effet de cumul précisé ci-après. Lorsqu'une nouvelle couche de cellules est formée, sa maturation produit une tension qui, du fait de l'adhérence de cette nouvelle couche aux plus anciennes, a tendance à comprimer ces dernières. Ainsi, petit à petit, le niveau de tension des couches périphériques diminue à mesure qu'elles deviennent plus internes avec l'accroissement en diamètre, jusqu'à s'annuler à un moment donné puis devenir un état de compression qui augmente progressivement vers le cœur.

Pour un hêtre vivant, comme pour



P. Geldaye, INRA

Fig. 3 : Fentes caractéristiques de la libération des contraintes de croissance à l'abattage dans une grume de hêtre

tout arbre, les contraintes de croissance ne sont pas un problème, mais plutôt un outil ou un atout, d'autant que les caractéristiques mécaniques de son bois lui permettent de supporter des niveaux de contraintes élevés à cœur le plus souvent sans dommage. De plus, ses propriétés étant meilleures en traction qu'en compression, l'état de tension mécanique en périphérie de la tige créé par la maturation des cellules permet à l'arbre de diminuer les efforts de compression provoqués par l'oscillation de la tige sous l'effet du vent.

### ...puis la cause de fentes à l'abat-tage pour le forestier...

Les problèmes commencent au moment de l'abattage : la coupe rompt l'équilibre mécanique établi au fil des ans, provoquant une redistribution brutale des efforts sur une longueur correspondant à 2 à 3 diamètres à partir de la culée, redistribution qui entraîne l'augmentation des efforts tangentiels à l'origine de l'apparition de fentes caractéristiques partant de la moelle (figure 3).

Cette évolution de la répartition des contraintes va se poursuivre tout au long des opérations de débit. Ainsi, purger la partie éclatée d'une grume occasionne un nouveau déséquilibre et a pour effet de faire progresser les fentes un peu plus loin. Seule la mise en place d'esses en bout de grume semble pouvoir endiguer cette propagation en tirant parti du comportement mécanique du matériau qui va permettre une relaxation partielle des efforts internes au cours du temps de stockage. Certaines techniques d'abattage permettent de limiter les dommages : elles reposent sur une libération progressive des contraintes par annélation simple ou double ou encore par mortaisage de la charnière d'abattage.

### ...et, pour le transformateur, sources de défauts de forme au sciage et au séchage

Tout en diminuant d'intensité, les contraintes se redistribuent au fur

et à mesure du sciage. Ainsi la courbure d'une dosse ou d'un plateau lors de son débit est provoquée par la différence d'intensité de la contrainte de croissance longitudinale dans l'épaisseur du sciage ; de même la partie de la grume restante, bien que maintenue par des griffes, tend à acquérir une courbure (moindre) symétrique par rapport au plan de coupe et le sciage suivant aura une épaisseur plus faible aux extrémités et plus forte au centre que celle définie par le réglage de la machine. Ce sont des causes similaires qui expliquent l'éclatement des plateaux diamétraux.

Cependant, les problèmes ne s'arrêtent pas là pour le transformateur. En effet, les contraintes de maturation élevées sont associées à la présence de bois de réaction (bois de tension pour les Angiospermes comme le hêtre), qui se rétracte longitudinalement jusqu'à 10 fois plus que le bois normal et qui, par sa présence localisée, va entraîner des déformations très importantes lors du séchage.

#### **Vous avez dit nervosité ou... nervosité ?**

Ce nom désigne deux phénomènes liés mais de nature différente. Quand il correspond à l'apparition de fentes à l'abattage ou encore à la déformation d'un plateau lors du sciage c'est la libération des contraintes de croissance par la coupe qui est responsable du phénomène. Lorsqu'il est utilisé pour désigner la déformation d'une pièce en bois séchée, il fait référence à des mécanismes de retrait ou de gonflement du bois en réponse aux variations de teneur en eau. Le bois de réaction, fabriqué par la plante pour produire de fortes contraintes de maturation de manière très localisée, présente un retrait longitudinal dix fois plus important que celui du bois normal et explique ces déformations importantes, lorsqu'il y a un changement de l'humidité dans l'air par exemple.

## Comment évaluer les contraintes de croissance ?

### Définitions

d'après le « Dictionnaire trilingue des bois ronds et des bois sciés » du CTBA

**Bois de réaction** : bois qui présente des caractères anatomiques distinctifs ; il se forme typiquement dans les portions de tige penchées ou courbées et dans les branches quand l'arbre s'efforce de reprendre la position d'origine, si celle-ci a été perturbée. Dans les feuillus, il en résulte du bois de tension et dans les résineux du bois de compression.

**Bois de compression** : bois de réaction typiquement formé à la partie inférieure des branches et des tiges penchées ou recourbées des conifères.

**Bois de tension** : bois de réaction typiquement formé à la partie supérieure des branches et des tiges penchées ou recourbées des feuillus

L'évaluation des contraintes de croissance reste essentiellement du domaine de la recherche et, à notre connaissance, la seule application pratique concerne l'utilisation des faciès de fentes en bout de grume

d'eucalyptus par un système d'optimisation du débit dans l'industrie du sciage (CIS-MADERA et al. 2001).

### Au laboratoire

C'est à l'échelle cellulaire que prennent naissance les contraintes de croissance lors de la maturation.

Les contraintes de maturation les plus fortes sont associées au bois de tension qui a pour caractéristique anatomique la présence d'une couche gélatineuse, très riche en cellulose, qui se substitue partiellement à une couche de la paroi cellulaire normalement plus lignifiée. Sur coupe anatomique (effectuée au microtome), cette particularité permet la reconnaissance des cellules de bois de tension par une double coloration au bleu-astria et safranine qui a pour effet de colorer en bleu la cellulose et en rouge la lignine (figure 1). On peut ainsi déceler la présence plus ou moins importante de fortes contraintes de maturation.

### À l'atelier

À l'échelle macroscopique aussi, sur des rondelles, on utilise le bois de tension comme indicateur de niveaux élevés de contraintes de maturation. La coloration de

Herzberg (chloroiodure de zinc) est actuellement la méthode la plus utilisée pour le mettre en évidence, mais elle reste délicate à mettre en œuvre. Des travaux en cours dans notre laboratoire montrent que le bois de tension du hêtre peut être détecté visuellement. Il suffit pour cela de repérer les zones d'aspect nacré en observant sous une incidence rasante de la lumière naturelle, la surface d'un disque scié soigneusement et ressuyé (figure 4). La pertinence de cet indicateur est cependant à nuancer : le temps passant, du fait de la croissance en diamètre, la plage de bois de tension devient plus interne et le lien entre sa présence et le niveau de contraintes est modifié. En outre, l'observation de la répartition du bois de tension à l'intérieur d'un cerne de croissance révèle parfois des transitions un peu floues mais aussi des discontinuités qui indiqueraient que les *stimuli* responsables de sa mise en place peuvent disparaître au cours de la saison de végétation. Dans l'exemple de la figure 1, on voit dans le cerne de droite la disparition progressive des cellules de bois de tension avec l'avancée de la saison de végétation, puis dans le cerne suivant la réappari-



E. Farré, INRA

Fig. 4 : examen en lumière rasante d'une rondelle de hêtre, les plages de bois de tension sont révélées à l'arrière-plan par leur aspect brillant

On notera le pincement à la périphérie au niveau du trait de scie qui révèle l'état de compression dans la direction tangentielle aux cernes de croissance.

tion brutale et généralisée de ce type de cellules suite à une modification des *stimuli* inconnue, mais qui pourrait être associée à un déchaussement de l'arbre. Il reste que le bois de tension constitue la trace la plus visible du « passé biomécanique » de l'arbre. Une expérience facile à exécuter sur une rondelle de bois frais de quelques centimètres d'épaisseur consiste à réaliser un trait de scie radial de l'écorce à la moelle. La difficulté à sortir la lame exprime bien l'état de compression tangentielle présent dans la tige au voisinage de l'écorce même s'il est à peine visible sur la figure 2, du fait de sa valeur comprise entre 0 et -1MPa.

## En forêt

Un autre indicateur des contraintes de croissance correspond à la mesure en périphérie du tronc de l'élongation d'une portion de xylème après avoir séparé cette portion du reste de la grume. Plusieurs techniques coexistent avec des niveaux destructifs variables qui limitent leur utilisation à des arbres destinés à l'abatage. Actuellement, la technique la plus répandue, du fait d'un bon compromis alliant qualité de la mesure et simplicité de mise en œuvre, a été promue par le Cirad-Forêt ; elle consiste à mesurer le déplacement de deux pointes espacées verticalement de 45 mm après le perçage entre elles d'un trou de diamètre 20 mm, et de profondeur équivalente, qui libère les contraintes (figure 5). Le déplacement mesuré peut être relié à une valeur de contrainte en tenant compte de la géométrie de l'essai et des propriétés mécaniques du bois vert. Cet indicateur est très utilisé par la communauté scientifique qui s'intéresse à la biomécanique dans les arbres à tel point qu'il est communément désigné par le terme « indicateur de contrainte de croissance » (ICC). Lorsque l'arbre est debout, cette technique de mesure est très utile pour évaluer la variation des contraintes en périphérie de l'arbre à une hauteur donnée, en se basant

sur 8 positions réparties sur la circonférence. Cette méthode est aussi applicable lorsque l'arbre est abattu bien que, de ce fait, les contraintes dues à la gravité soient modifiées. Pour une hauteur donnée, la variation de ces contraintes entre les différents points de mesure notés selon leur position angulaire donne une courbe d'allure sinusoïdale comme on peut le voir sur la figure 6. Lorsque la tige est inclinée, l'amplitude maximale correspond presque toujours à la position de la face supérieure de la tige (Position n° 5 dans la figure 6). Pour une longueur de référence de 45 mm, les déplacements mesurés vont de 20 microns pour les valeurs les plus faibles à plus de 200 microns pour les maximales.

On ne saurait parler des contraintes de croissance dans le hêtre sans évoquer une technique de mesure utilisée dans les années 80 et qui a été à l'origine de plusieurs travaux (Polge (1981), Ferrand (1982a, 1982b, 1983)). Celle-ci est basée sur l'utilisation de carottes de sondage extraites à la tarière de Pressler. Les auteurs ont montré la corrélation négative ( $r = -0,67$ ) qui existait entre le diamètre mesuré dans la direction tangentielle de la carotte à l'état vert à proximité du cambium et les contraintes de croissance évaluées selon une méthode plus conventionnelle (Saurat et Gueneau (1976)). Malheureusement, le diamètre de la carotte dépendait également de la tarière ce qui rendait impossible la



T. Constant, INRA

Fig. 5 : capteur mis au point par le Cirad-Forêt pour mesurer les Indicateurs de Contraintes de Croissance

La vue est prise à la fin d'une série de 8 mesures à la périphérie d'un tronc. À gauche de l'image se trouve le gabarit qui permet de positionner les pointes et le centre du trou à percer pour libérer les contraintes de croissance. Au centre, les pointes, enfoncées au marteau, supportent le capteur.

comparaison de deux échantillons s'ils étaient sondés avec des tarières différentes. Insistons cependant sur le fait qu'en utilisant une tarière unique correctement affûtée, cette technique a permis d'évaluer à peu de frais et sur de larges échantillonnages les effets sylvicoles et stationnels sur les contraintes de croissance dans le hêtre et dans plusieurs autres essences.

### Quels facteurs affectent la distribution des contraintes de croissance ?

#### Forme de l'arbre

Lors d'un nouveau cycle de croissance, l'incrément de masse dû au développement de l'arbre augmentera essentiellement les contraintes supportées par le bois déjà formé de manière assez passive. Indirectement, la gravité détermine aussi la réaction qui s'exprimera par le développement de contraintes de maturation. Ainsi la forme de la tige, par la courbure, l'inclinaison qu'elle présente, influe sur la localisation du moteur de cette réaction, le bois de tension, qui en se développant de préférence sur la partie supérieure d'une tige inclinée et en exerçant lors de sa maturation une contrainte plus intense que celle du bois normal crée un couple moteur

qui tend à redresser l'axe concerné. De manière associée, la réaction de l'arbre est également dépendante des signaux physiologiques qui, sans obligatoirement conduire à la mise en place de bois de réaction, vont entraîner une croissance radiale différente selon les directions et produire une certaine correction de la forme.

On comprend ainsi que la morphologie de l'arbre est un facteur important à prendre en compte pour appréhender les mécanismes de développement des contraintes de croissance. Ferrand (1982b) a mis en évidence une augmentation des valeurs d'ICC (indicateur de contraintes de croissance) avec l'inclinaison du hêtre mais sans parvenir à établir une relation liant leurs intensités.

De nombreux progrès ont été réalisés à partir des années 80 sur la connaissance des mécanismes de base. Du point de vue de la modélisation, ces mécanismes de base ont été couplés à un « moteur de croissance » reposant sur une approche architecturale dans le cadre des travaux menés par Fourcaud (2003a, 2003b) et les résultats acquis, bien que peu validés, laissent penser que le formalisme utilisé peut rendre compte du développement des contraintes de croissance dans une tige.

D'un point de vue plus forestier, dans le projet européen FAIR CT98-3606 *Stresses in Beech* (Becker et al. 2001) (cf. encadré), 500 arbres ont été échantillonnés dans 5 pays, et 10 peuplements au total. Les auteurs ont observé une corrélation négative significative entre le diamètre à 1,30 m et le niveau des ICC. En termes de hauteur dans l'arbre, la valeur moyenne des ICC était statistiquement plus élevée à 4,50 m qu'à 1,30 m sans que cette différence soit systématiquement perceptible au niveau de l'arbre individuel du fait de la grande dispersion des valeurs. Enfin, pour aborder l'impact du houppier sur les contraintes de croissance, les ICC sont corrélés significativement et de manière négative avec les caractéristiques de dimensions du houppier (volume et surface de projection). Ces résultats confirment ceux obtenus par Ferrand (1983).

#### Autrement dit, et en résumé :

les indicateurs de contraintes de croissance sont maximaux à la partie supérieure d'une tige inclinée de hêtre. Ils sont statistiquement plus faibles en bas qu'en haut, sans que cela se vérifie forcément au niveau individuel. De même, ils diminuent lorsque le diamètre des arbres augmente. Ce constat s'applique aussi aux ratios  $H_{tot}/D_{130}$  : ainsi des arbres élancés et fins, que l'on trouvera typiquement dans des futaies denses, auront des contraintes de croissance plus fortes que des arbres trapus et courts ressemblant à ceux des taillis-sous-futaie. De même des arbres ayant des surfaces ou des volumes de houppier importants sont moins sujets à des contraintes élevées.

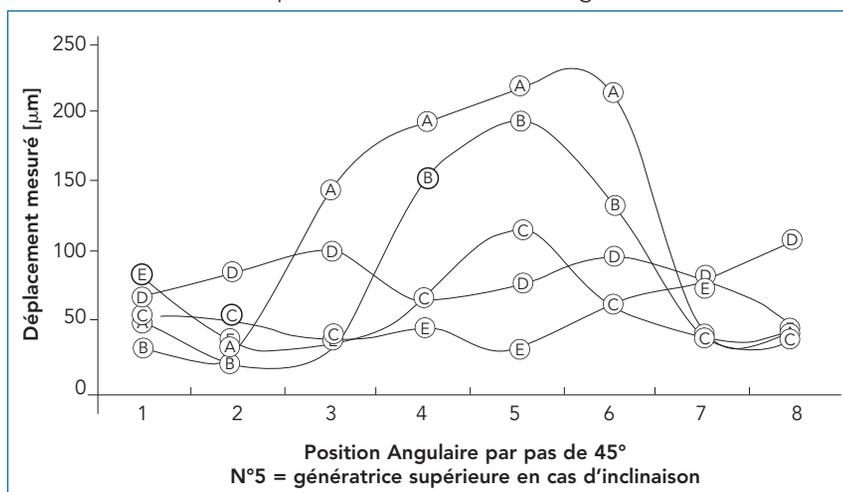


Fig. 6 : mesure des Indicateurs de Contraintes de Croissance

Représentation de 5 séries (A, B, C, D et E) typiques de 8 mesures de déplacement longitudinal équiréparties à la périphérie d'un tronc. Dans le protocole, la position 5 se situe à la partie supérieure des tiges lorsqu'elles sont inclinées, là où le bois de tension se forme préférentiellement. Les déplacements sont exprimés en micromètre.

#### Facteurs stationnels

Dans le projet européen *Stresses in Beech*, on observe en direction des vents dominants d'Ouest une valeur légèrement plus élevée des ICC sans que cette différence soit qualifiée de significative. La pente du terrain intervient de façon significative, mais pour expliquer moins de 3 % de la variabilité observée des ICC.

Les auteurs soulignent que la très forte variabilité intra et interarbre des ICC au sein d'un même peuplement ne facilite pas la mise en évidence d'effet dû à la station.

Pour ce qui concerne l'impact du type de sol, seul Ferrand (1982) apporte quelques éléments sur l'effet positif que pourraient avoir les rendzines (éventuellement brunifiées) sur le niveau des contraintes. Mais il faudra certainement mieux mesurer les facteurs causals des contraintes de croissance au niveau de l'arbre individuel avant de se pencher efficacement sur l'impact de la station. Cependant, il est certain que la station joue un rôle par l'ancrage racinaire qu'elle permet pour maintenir la position de l'arbre et éviter des scénarios aboutissant ce que l'on observe sur la figure 1 : une forte production de bois de tension pour répondre à un probable déséquilibre.

## Effet de la sylviculture

Guéneau et Saurat (1976) les premiers avaient mis en évidence une

différence entre les hêtres de futaie et de taillis-sous-futaie en échantillonnant dans les principales régions de production. Cela a ensuite été confirmé plusieurs fois et relié au rapport h/d qui reflète assez bien l'historique de compétition subi par l'arbre dans les situations sylvicoles étudiées. L'étude de 2001 (Becker et al. 2001), où les types de peuplement sont plus nombreux, précise que le rapport h/d expliquerait alors 10 % de la variabilité des contraintes de croissance. Dans le même esprit, une corrélation significative apparaît entre le niveau d'ICC moyen et différents indices de compétition, traduisant le fait que la compétition favorise des contraintes de croissance élevées.

En se basant sur les diamètres de carottes de sondage prélevées dans le dispositif en Carré latin de Souilly (55) offrant des intensités d'éclaircie très contrastées, Polge (1981) a mis en évidence un effet (significatif au seuil de 1/100) du traitement : les contraintes de croissance dimi-

nuaient quand l'intensité des éclaircies, caractérisée par la surface terrière, augmentait.

Plus récemment, dans le projet Stresses in Beech, un sous-échantillon de 83 arbres a été étudié, ces arbres étant groupés selon leur profil de largeurs de cernes (régulier, décroissant, croissant) sur les 100 ans ayant précédé l'abattage : aucune différence significative du niveau moyen d'ICC n'est apparue entre les groupes. En revanche, sur une période de 10 ans précédant la coupe, les arbres présentant une tendance à l'augmentation de leurs accroissements avaient des niveaux de contraintes de croissance significativement plus faibles que ceux de tendance régulière ou décroissante. Ainsi le forestier en anticipant la coupe finale par une éclaircie diminuerait significativement le niveau des contraintes. Ce dernier constat est assez prometteur et apporte un intérêt supplémentaire à l'approche par modélisation envisagée (cf. encadré).

### Stresses in Beech

Le projet Stresses in Beech a été conduit de 1998 à 2001 par un consortium de cinq pays dont la France, représentée par le Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil de Montpellier, sous la coordination de l'Institut d'Utilisation des Forêts et des Sciences du Travail de l'Université Albert-Ludwig de Fribourg-en-Brigau (Allemagne). Ce projet a recensé, par des enquêtes et des tests menés en laboratoire, les conséquences techniques et économiques des contraintes de croissance dans le hêtre et les moyens d'y remédier lors de la transformation des produits. Du point de vue sylvicole, l'étude a porté sur des peuplements, échantillonnés en deux temps : d'abord sur des substrats aussi similaires que possible (en l'occurrence du calcaire) pour tester des variables géographiques et climatiques, ensuite en choisissant des peuplements représentatifs du pays concerné en terme de conduite sylvicole (par exemple des taillis-sous-futaie en France, ou des peuplements sur de fortes pentes en Suisse et en Autriche). Des analyses statistiques ont été menées pour tenter de relier les valeurs des indicateurs de contraintes de croissance aux caractéristiques du peuplement (pente, exposition, historique de gestion etc.) et de l'arbre (diamètre, hauteur, architecture, projection de houppier, etc.). Bien que cette base de données unique en son genre puisse être encore exploitée, les résultats disponibles à ce jour confirment surtout des résultats déjà connus en les renforçant : ils apportent de nouvelles pistes comme le niveau significativement plus faible des contraintes pour des arbres libérés de la compétition pendant les 10 années précédant leur exploitation. Le faible caractère explicatif des variables testées par rapport aux indicateurs de contraintes de croissance (13 % au mieux de la variabilité expliquée) milite pour une approche sensiblement différente mais non contradictoire où seront plus ciblées les relations instantanées, à l'échelle de quelques années, entre le port de l'arbre et son développement, avec un regard particulier sur l'impact du houppier et de la croissance en diamètre sur la distribution du bois de tension.

### Liaison entre contraintes de croissance et propriétés du bois.

Nous avons déjà évoqué l'association entre le bois de tension et les fortes contraintes de maturation et, en particulier, l'impact de son retrait longitudinal beaucoup plus élevé sur la déformation des produits.

Pour la densité du bois, très liée aux propriétés mécaniques, il est difficile de découpler l'effet des contraintes de croissance de celui du traitement sylvicole (Keller 1976). Ferrand (1982) rapporte que la densité a tendance, comme les contraintes, à diminuer avec le diamètre des arbres.

Ce dernier a également montré que le module d'élasticité longitudinal du bois (= rapport entre les contraintes et les déformations), qui peut se mesurer indépendamment des contraintes de croissance, avait une valeur plus élevée et traduisait donc un comportement plus rigide là où les déformations mesurées en périphérie des arbres (voir figure 5) étaient fortes. À des déformations de maturation importantes corres-

### Modélisation

Depuis le début des années 1990 et l'essor de l'informatique, la modélisation a profondément modifié la nature des recherches forestières, notamment dans le domaine de la croissance et de la qualité. Si, au départ, les modèles de croissance d'arbre n'étaient qu'une version moderne des tables de production, leur conception a évolué et certains s'imbriquent pour rendre compte de situations de plus en plus complexes où les facteurs interagissent : les résultats de simulations ne restituent plus seulement une production en volume selon la sylviculture appliquée, mais également des indicateurs de gestion durable en termes de stock de carbone, d'impact sur l'emploi (Bucket et al. 2005), etc. Néanmoins, pour parvenir à greffer une problématique comme celle des contraintes de croissance sur un modèle existant, il faut pouvoir définir comment interagissent les différents mécanismes et comment en rendre compte à travers la description fournie par le modèle initial. Plus l'information est détaillée plus le modèle biomécanique pourra s'appuyer sur les mécanismes de base même si cela entraîne des difficultés techniques liées au nombre de données à prendre en compte. Dans le cas du pin maritime (Programme AMAP du Cirad/LRBB), ce travail a été mené à bien par Fourcaud et ses coauteurs (2003a, 2003b) selon une approche architecturale détaillée de l'arbre.

Cependant la majorité des modèles de croissance disponibles actuellement font l'impasse sur la notion de forme du tronc, hormis le défilement, et la couronne y est au mieux une enveloppe convexe tridimensionnelle pour laquelle il n'existe que peu d'information sur la distribution spatiale des masses. Ainsi, un enjeu important réside dans l'établissement d'un lien entre la forme du houppier et les efforts mécaniques qu'il engendre sur le tronc. Cette information pourrait servir à quantifier la réaction qui se met en place dans le tronc compte tenu de sa forme et des efforts supplémentaires dus au développement du houppier. Cela nécessite également de mettre au point une relation définissant un seuil d'apparition des cellules de bois de tension. Dans l'hypothèse où nous pourrions résoudre ces différents problèmes, nous pourrions alors coupler de façon pertinente un modèle de croissance d'arbre à un modèle biomécanique.

précédente, nous avons vu que même en traitement régulier les informations à sa disposition étaient limitées, trop limitées en tout cas pour rendre compte des caractéristiques de croissance dont nous avons besoin pour appréhender le niveau de contraintes dans les arbres autrement que sur un plan statistique (déjà bien étudié par le passé).

**D'un point de vue scientifique,** c'est par le couplage d'un modèle biomécanique avec un modèle spatialisé de croissance d'arbre qu'un optimum dans le contrôle des contraintes de croissance par la sylviculture pourra être recherché ; il s'agira, en peuplements mélangés et/ou irréguliers, de rendre compte de la compétition subie par un individu à travers la forme de sa tige et le déséquilibre de son houppier, et d'en préciser l'impact en termes d'apparition des contraintes de maturation et de leur effet cumulatif sur les contraintes de croissance.

Dans ce domaine de modélisation, des travaux assez nombreux ont déjà ouvert la voie. Qu'ils s'adressent à la partie biomécanique ou à la partie modélisation de la croissance des arbres en se basant sur des approches soit architecturales, soit statistico-dendrométriques, leur principal inconvénient est de ne pas avoir eu le hêtre en point de mire. Cependant, l'évolution de ces outils ouvre des perspectives intéressantes d'aboutissement pour l'essence qui nous intéresse aujourd'hui.

Mais il faudra combler le déficit de connaissance sur la quantification des relations entre les stimuli identifiés, comme la gravité ou le phototropisme, et la réponse que l'arbre met en place dans sa tige, notamment par le développement de plages de bois de tension. C'est dans ce champ qu'une grande partie de nos efforts des prochaines années sera investie pour tenter d'établir des relations tenant compte des morphologies du houppier et de la tige en vue de leur intégration ultérieure dans un modèle.

pondraient ainsi des caractéristiques mécaniques plus rigides. Comme les contraintes de maturation s'évaluent en multipliant le module d'élasticité par les déformations mesurées, on conçoit aisément l'alliance de ces deux mécanismes pour renforcer la dissymétrie des contraintes.

Pour la fibre torse, Ferrand a mis en évidence, dans l'étude déjà citée, des déformations 30 % plus élevées dans des arbres à fil tors, et qui associées à des modules d'élasticité longitudinale plus élevés conduisent à un facteur multiplicatif des contraintes de 1,55. Accessoirement, on peut démontrer que, à contraintes égales dans le sens du fil du bois, la contrainte diminue dans la direction axiale du tronc en présence de fil tors. Par ailleurs, en marge de ses résultats, Ferrand a suggéré que, en plus de la forte héritabilité de ce caractère, la pré-

sence de la fibre torse pourrait être affectée par des facteurs environnementaux.

### Conclusions

Qu'elle soit modulée ou non par des actions anthropiques, la compétition entre les arbres pour l'espace est le principal moteur à retenir pour expliquer le développement des contraintes de croissance. Les interrogations sur l'impact du traitement irrégulier sur le niveau des contraintes de croissance dans les tiges de hêtre sont donc bien des questions légitimes qui doivent être abordées sous l'angle des effets de ce type de traitement sur la dynamique de développement dans l'espace des tiges et des houppiers. Dans ces situations le forestier se trouve face à des cas complexes à apprécier du point de vue de l'historique de compétition subi par un individu. Dans la partie

### D'un point de vue plus appliqué

à court terme, s'il est établi que la rectitude du fût ne garantit pas l'absence de contraintes néfastes, certains facteurs de forme comme l'inclinaison ou le rapport de la hauteur totale au diamètre à 1,30 m sont des informations significatives qui reflètent la compétition subie par l'arbre. Par le passé, les tentatives pour lier la forme de l'arbre à un niveau d'intensité des contraintes de croissance se sont avérées peu concluantes. Il apparaît pourtant intéressant de s'interroger sur l'information contenue dans la forme actuelle de l'arbre, en tenant davantage compte de la forme du houppier car elle pourrait donner quelques clefs pour comprendre le déterminisme de mise en place du bois de tension dans la tige, permettre d'affiner des critères d'appréciation de la compétition subie par l'arbre et fournir ainsi des indications utiles au forestier.

Enfin, si le lien entre forme de l'arbre et contraintes de croissance est difficile à décrypter au stade de l'exploitabilité (arbre âgé), on peut considérer que, à un stade plus juvénile, la forme est à prendre en compte dans l'évaluation du potentiel de l'individu à réagir favorablement à l'action du forestier, en particulier pour une essence sciaphile comme le hêtre. Des actions dans ce sens sont envisagées dans le cadre d'un projet d'étude de l'ONF, auquel le Lerfob est associé, sur la réactivité des perches en forêt irrégulière.

**Thierry CONSTANT**

**Gérard NEPVEU**

Lerfob, UMR INRA-ENGREF,  
Champenoux (54)

Équipe « Qualité des Bois »

constant@nancy.inra.fr

nepveu@nancy.inra.fr

**G. BECKER**

Institut d'Utilisation des Forêts et  
des Sciences du Travail Forestier  
Université de Fribourg (Allemagne)  
institut@fobawi.uni-freiburg.de

### Bibliographie

BECKER G. *et al.*, 2001. Occurrence and Relevance of Growth stresses in Beech (*Fagus sylvatica* L.) in central Europe. Final Report FAIR Project CT98-3606 "Stresses in Beech, G. Becker ed., Institut d'Utilisation des Forêts et des Sciences du Travail, Université Albert-Ludwig de Fribourg-en-Brisgau (Allemagne). 323 p.

BUCKET E., LE MOGUEDEC G., MOTHE F., NEPVEU G., 2005. Une modélisation des bilans "environnement" et "produits" de sylvicultures contrastées : cas du chêne sessile. *Revue Forestière Française*, vol. 57, n°3, pp. 311-330

FERRAND J.C., 1982a. Etude des contraintes de croissance. Première partie : méthode de mesure sur carottes de sondage. *Annales des Sciences Forestières*, vol. 39, n° 2, pp. 109-142

FERRAND J.C., 1982b. Etude des contraintes de croissance Deuxième partie : variabilité en forêt des contraintes de croissance du Hêtre (*Fagus sylvatica* L.). *Annales des Sciences Forestières*, vol. 39, n° 3, pp. 187-217

FERRAND J.C., 1983. Les contraintes de croissance et leurs conséquences en matière de sylviculture et de sciage. *Revue Forestière Française*, vol. 35, n° 5, pp. 327-339

FOURCAUD T., LAC P., 2003a. Numerical modelling of shape regulation and growth stresses. I- An incremental static finite element formulation. *Trees - Structure and Functions*, vol. 17, n° 1, pp. 23-30

FOURCAUD T., BLAISE F., LAC P., CASTERA P., DE REFFYE P., 2003b. Numerical modelling of shape regulation and growth stresses. II- Implementation in the AMAPpara software and simulation of tree growth. *Trees - Structure and Functions*, vol. 17, n° 1, pp. 31-39

FOURNIER M., CHANSON B., GUITARD D., THIBAUT B., 1991a. Mécanique de l'arbre sur pied : modélisation d'une structure en croissance soumise à des chargements permanents et évolutifs. I- Analyse des contraintes de support. *Annales des Sciences Forestières*, vol. 48, n° 5, pp. 513-525

FOURNIER M., CHANSON B., THIBAUT B., GUITARD D., 1991b. Mécanique de l'arbre sur pied : modélisation d'une structure en croissance soumise à des chargements permanents et évolutifs. II- Analyse tridimensionnelle des contraintes de maturation : cas du feuillu standard. *Annales des Sciences Forestières*, vol. 48, n° 5, pp. 527-546

POLGE H., 1981. Influence des éclaircies sur les contraintes de croissance du hêtre. *Annales des Sciences Forestières*, vol. 38, n° 4, pp. 407-423

SAURAT J., GUENEAU P., 1976. Growth Stresses in Beech. *Wood Science and Technology*, vol. 10, pp. 111-123

CIS-MADERA, CIRAD-FORET, HERMANOS SANCHEZ PENA, PARQUETS LORENZO, MADERAS BETANZOS, MÖHRINGER, SARDINHA, LEITE, 2001. RTD of sawmilling systems suitable for European *Eucalyptus globulus* affected by growth stresses. Cooperative Research Project FAIR MA2B-CT98-9579 Final Technical report.