



HAL
open science

Les contraintes de croissance dans les tiges : modélisation de leur mise en place et de leur fonction biologique

Tancrede Alméras, Joseph Gril, Delphine Jullien, Mériem Fournier

► **To cite this version:**

Tancrede Alméras, Joseph Gril, Delphine Jullien, Mériem Fournier. Les contraintes de croissance dans les tiges : modélisation de leur mise en place et de leur fonction biologique. *Revue forestière française*, 2008, 60 (6), pp.749-760. <10.4267/2042/28374>. <hal-00546298>

HAL Id: hal-00546298

<https://hal.science/hal-00546298v1>

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.



HAL Authorization

LES CONTRAINTES DE CROISSANCE DANS LES TIGES : MODÉLISATION DE LEUR MISE EN PLACE ET DE LEUR FONCTION BIOLOGIQUE

TANCRÈDE ALMÉRAS - JOSEPH GRIL - DELPHINE JULLIEN - MERIEM FOURNIER

Au cours de leur croissance, les arbres accumulent dans leur tronc des contraintes mécaniques, dites “contraintes de croissance”. Ce fait est la source directe de difficultés qui se posent parfois lors de leur exploitation et de leur transformation et peuvent fortement réduire les rendements : éclatement de la bille de pied à l’abattage, fentes à cœur, fentes et déformations des planches au sciage (photo 1, ci-dessous). Cet article a pour but d’exposer brièvement l’origine de ces phénomènes d’un point de vue mécanique (comment les contraintes de croissance s’accumulent dans les tiges au cours de leur croissance) en s’intéressant à leur rôle biologique (en quoi elles sont utiles à l’arbre sur pied, pour contrôler sa forme et sa résistance à la flexion). Le lecteur désirant approfondir les aspects les plus concrets pourra se reporter à un article de la *Revue forestière française* (Ferrand, 1983) consacré aux préconisations, en termes de sylviculture et de sciage, destinées à limiter ces problèmes. En conclusion, nous essaierons de montrer en quoi la compréhension des mécanismes en jeu et de leur fonction pour l’arbre peut être utile dans la recherche de telles solutions.



Photo 1 Fente en bout après abattage et déformations au sciage, conséquences directes des contraintes de croissance

Photos fournies par Pr. Hiroyuki Yamamoto, Université Nagoya, Japon

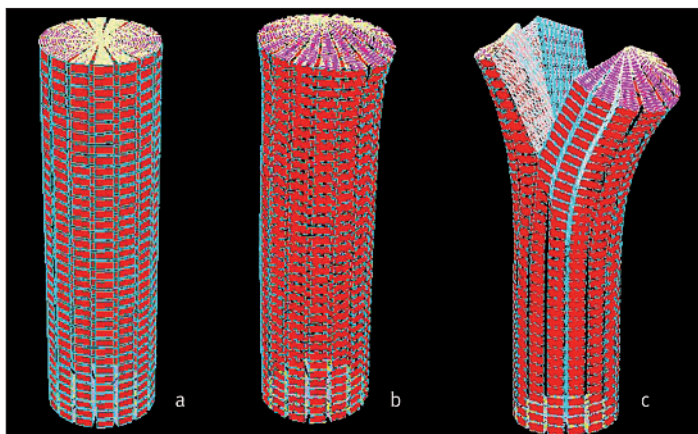
Les fentes à l’abattage et au sciage résultent de la redistribution des contraintes mécaniques qui a lieu lorsque la grume est sciée, qui est très dépendante de l’hétérogénéité des contraintes préexistantes dans le tronc (Jullien *et al.*, 2003). L’analyse mécanique de la mise en place de ces contraintes dans les troncs (Fournier *et al.*, 1991a ; Fournier *et al.*, 1991b) permet de comprendre l’origine de ces problèmes. Typiquement, un tronc est comprimé à cœur et tendu en périphérie, c’est-à-dire que, si on l’isolait du reste de la grume, une pièce de bois prélevé à cœur tendrait

à être un peu plus longue que dans la grume, alors qu'une pièce de bois prélevée en périphérie tendrait à être un peu plus courte. Ces déformations, de l'ordre de quelques pour mille, sont aisément mesurables (Fournier *et al.*, 1994) et correspondent à des contraintes mécaniques de quelques dizaines de MPa (c'est-à-dire à plusieurs kg/mm²). Dans l'arbre sur pied, les parties internes et externes sont contraintes à être solidaires et l'équilibre mécanique résulte d'une compensation entre les efforts de compression et de tension (figure 1a, ci-dessous). L'abattage crée une surface libre qui perturbe l'équilibre mécanique près du bord fraîchement scié (figure 1b, ci-dessous). Ceci se manifeste par exemple par le fait que les sections sont en général légèrement bombées, si bien que les billons ne sont plus tout à fait jointifs. Le risque d'apparition et de propagation d'une fente est fortement accentué : sur chaque partie de la grume ou de la planche éclatée, un mouvement de flexion a lieu, dû à l'effet du gradient radial de contraintes qui génère une poussée du côté interne et une traction du côté externe (figure 1c).

FIGURE 1

RELATIONS ENTRE LES PRÉCONSTRAINTES DANS LE TRONC ET LES DÉFORMATIONS LORS DE LA DÉCOUPE

Les schémas représentent la simulation numérique (d'après Jullien *et al.*, 2003) des déformations induites par les contraintes de croissance dans une grume de 10 cm de rayon et de 70 cm de haut. Les déformations ont été amplifiées 10 fois pour faciliter la visualisation.



(a) grume dans l'arbre ; (b) après sciage, la section de la grume est bombée à cause de la pré-compression du bois interne et de la pré-tension du bois périphérique ; (c) la libération partielle de ces contraintes crée des mouvements de flexion qui entraînent la propagation des fissures.

L'étude de la mise en place des contraintes de croissance dans le tronc (Archer, 1986) a montré qu'elles sont en réalité la superposition de deux sources de contraintes bien distinctes : les contraintes "de support" et les contraintes "de maturation". Les premières sont le résultat passif de l'augmentation progressive du poids de l'arbre qui intervient simultanément à sa croissance en diamètre. Les secondes sont le résultat de contraintes actives développées par l'arbre : après sa formation, le bois subit une phase de "maturation" au cours de laquelle des transformations physico-chimiques entraînent une tendance à se déformer. Ces déformations sont empêchées car le nouveau bois adhère au noyau central de bois, si bien que le bois nouvellement formé se trouve contraint. Ces contraintes de maturation peuvent être facilement mises en évidence et mesurées en périphérie du tronc.

Les contraintes de maturation ont au moins deux rôles biomécaniques importants pour l'arbre : le contrôle de l'orientation et l'optimisation de la résistance à la flexion du tronc. La première

fonction est assurée par la modulation de l'intensité des contraintes mises en place à la périphérie du tronc, *via* le développement asymétrique de bois à forte contrainte (bois de réaction). Cette asymétrie, cumulée à la croissance excentrique à laquelle elle est souvent associée (Alméras *et al.*, 2005), génère des mouvements actifs de flexion qui permettent à l'arbre de compenser l'effet de différentes sources de déséquilibre (inclinaison du tronc, excentrement du houppier) et sont nécessaires à la croissance érigée sur le long terme (Alméras et Fournier, 2009). Ce mécanisme, qui contrôle activement la rectitude de la tige par la mise en place de gradients circonférentiels de propriétés du bois, intervient donc dans le déterminisme de deux critères importants de qualité du tronc : la forme qui conditionne fortement les rendements à la première transformation, et l'hétérogénéité des propriétés du bois qui nuit fortement à la qualité des produits.

La seconde fonction biomécanique assurée par les contraintes de maturation est l'optimisation de la résistance du tronc à la flexion, par exemple causée par le vent. La flexion d'une poutre⁽¹⁾ implique localement une mise en compression du matériau du côté interne de la courbure et une mise en tension symétrique de l'autre côté. L'endommagement de la poutre a lieu lorsque l'un ou l'autre de ces côtés atteint un niveau de contrainte supérieur à la résistance du matériau. Or, le bois, notamment à l'état vert, est beaucoup moins résistant en compression qu'en tension. Une pré-tension en périphérie lui permet donc de retarder la mise en compression du côté interne de la courbure et, par conséquent, de résister à une flexion plus importante qu'une structure analogue qui ne serait pas précontrainte.

Dans cet article, nous décrivons brièvement un modèle rendant compte des mécanismes de mise en place des contraintes de support et de maturation, et analysons, *via* des simulations, l'effet de différents paramètres sur le profil de contraintes de croissance et les conséquences sur la résistance du tronc à la flexion.

CONTRAINTES DE SUPPORT

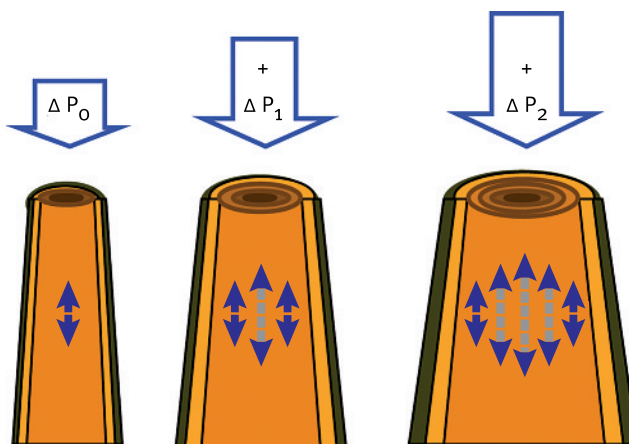
Accumulation au cours de la croissance

Les contraintes de support proviennent de l'interaction entre la rigidification du tronc (croissance en diamètre) et son chargement (croissance en masse). Dans le tronc, toute section supporte un chargement axial dû au poids de la partie de l'arbre située au-dessus d'elle. Quand une poutre est soumise à un chargement, des contraintes de support apparaissent, de sorte que la somme de ces contraintes crée une force de réaction qui s'oppose au poids de la charge. Dans le cas d'une poutre soumise à un chargement axial, les contraintes se répartissent uniformément sur la section. À la différence des structures mécaniques classiques, le chargement de l'arbre en croissance se fait progressivement sur une section qui, elle aussi, augmente progressivement. Sur une période courte, on peut négliger la variation de diamètre, et l'accroissement de masse se traduit par un incrément de contraintes réparti sur toute la section. Mais, sur une période plus longue, il faut tenir compte du fait que la section varie. Chaque cerne de croissance ne participant au support des incréments de poids qu'à partir de sa création, les différents cernes ne sont pas tous dans le même état de contrainte. Les cernes internes, les plus anciens, contribuent au support depuis le début de la vie de l'arbre, et ont donc accumulé une plus forte contrainte de compression que les cernes externes, qui ne contribuent qu'au soutien des incréments de poids récents (figure 2, p. 752).

(1) En mécanique, le terme de "poutre" désigne une structure élancée.

FIGURE 2 **MÉCANISME D'ACCUMULATION DES CONTRAINTES DE SUPPORT DANS UN TRONC HOMOGÈNE ET ÉQUILIBRÉ EN CROISSANCE**

À chaque étape de croissance, l'incrément de poids ΔP se traduit par un incrément de contraintes de compression uniforme dans la section (flèches bleues), qui se cumule aux contraintes précédemment accumulées (prolongement des flèches, figuré en gris). La partie centrale du tronc supporte des incréments de poids depuis le début de la croissance et est donc fortement comprimée. Les parties périphériques ne contribuent qu'au support des incréments de poids récents et sont donc moins fortement comprimées. Le bois tout récemment formé ne porte quasiment aucune charge.



Contraintes de support dans un arbre déséquilibré

Quand un arbre présente un déséquilibre mécanique, dû à l'inclinaison du tronc ou au développement asymétrique du houppier, l'incrément de poids propre se traduit par des effets de flexion qui induisent un champ de contraintes différent du cas de la compression axiale. À chaque étape élémentaire de croissance, l'incrément de poids produit un gradient de déformations allant linéairement d'une contraction maximale du côté inférieur du tronc à une extension maximale du côté supérieur. Si le tronc est de rigidité homogène, cela induit un gradient de contrainte lui aussi linéaire, qui se superpose aux contraintes précédemment accumulées (dans le cas d'une hétérogénéité de la qualité du bois, le calcul est un peu plus complexe, voir par exemple Alméras *et al.* 2005, mais les résultats restent qualitativement similaires). Comme dans le cas de l'arbre droit soumis à de la compression axiale, le bois le plus récent ne contribue à supporter que les charges qui sont postérieures à sa formation.

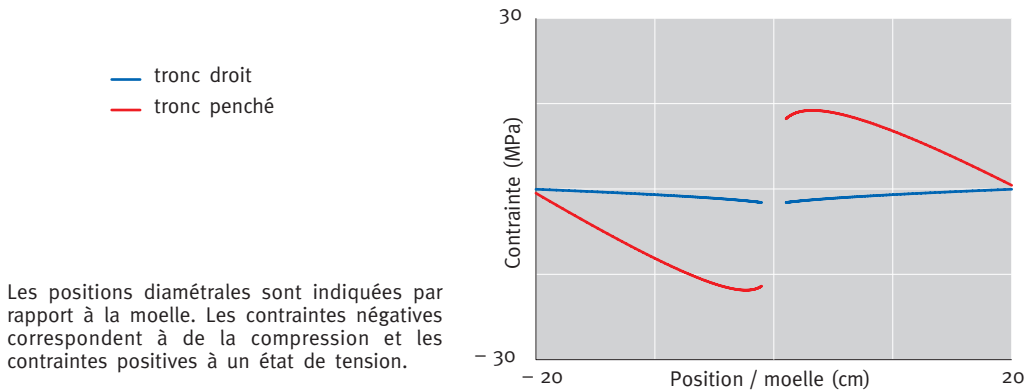
Simulation des profils de contraintes de support

Les profils de contraintes de support dans un arbre ont été simulés dans le cas d'un arbre droit, vertical, soumis à une compression axiale sous l'effet de son propre poids, et dans le cas d'un arbre penché de 5° qui fléchit sous son propre poids (figure 3, p. 753). La simulation est réalisée pour un arbre croissant d'un diamètre $D = 2$ cm à $D = 40$ cm. Les efforts de compression et de flexion liés à l'augmentation du poids sont calculés en se basant sur des lois d'allométrie liant le diamètre à la hauteur et à la masse de l'arbre, en supposant que le bois est de densité homogène.

Dans le cas du tronc vertical, l'intégration au cours du temps de l'effet du poids crée un gradient de contraintes, avec une compression maximale à cœur et nulle en périphérie. Cependant, il faut noter que ces contraintes restent d'intensité assez faible. Les contraintes générées par les

FIGURE 3

**PROFILS DE CONTRAINTE DE SUPPORT LE LONG D'UN DIAMÈTRE
SIMULÉS POUR UN TRONC PARFAITEMENT VERTICAL
ET UN TRONC INCLINÉ DE 5°**

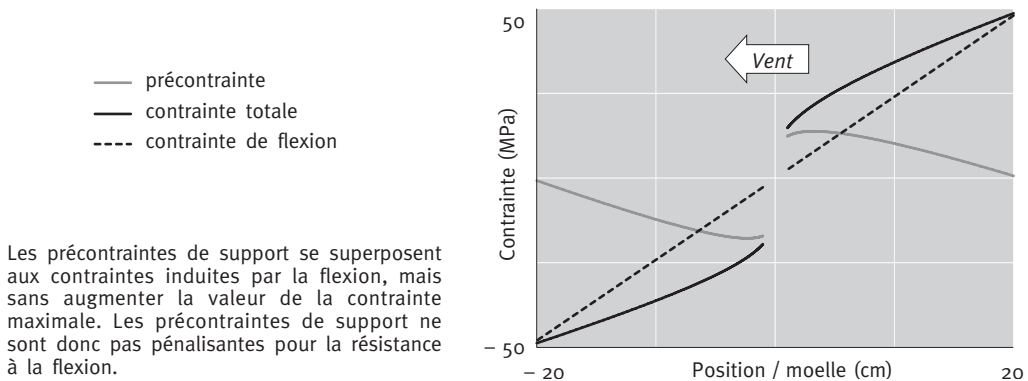


flexions sont d'intensité beaucoup plus importante, et présentent un profil différent, avec de la compression du côté inférieur et de la tension du côté supérieur. Mais ce profil de contraintes est très différent de celui que l'on obtiendrait en fléchissant une structure qui n'est pas en croissance : au lieu d'être maximale au bord et nulle au centre, la contrainte de chaque côté est maximale près du cœur et nulle en périphérie.

Conséquences des contraintes de support sur la résistance du tronc à la flexion

Ce profil est en soi avantageux pour l'arbre car il lui permet d'augmenter sa capacité à résister à des efforts de flexion d'origine extérieure, tels que l'effet du vent. En effet, ces flexions entraînent un supplément de contrainte qui est maximal aux bords et nul au centre. L'état de contrainte de l'arbre après flexion est la superposition des précontraintes (déjà existante) et des contraintes de flexion. Comme le montre la figure 4 (ci-dessous), la présence de précontraintes de support dans le tronc n'augmente pas le niveau maximal de contrainte et donc ne pénalise pas l'arbre

**FIGURE 4 EFFET D'UNE FLEXION D'ORIGINE EXTÉRIEURE (VENT PAR EXEMPLE) SUR UN ARBRE
AYANT UN PROFIL DE CONTRAINTES DE SUPPORT
CORRESPONDANT À UN ARBRE PENCHÉ**



pour résister aux flexions extérieures. L'arbre peut donc supporter des charges supplémentaires comme s'il n'était pas pré-charge par son propre poids, en répartissant efficacement les contraintes sur la section : le poids propre est essentiellement porté par le bois ancien, et les charges extérieures par le bois nouveau, périphérique.

CONTRAINTES DE MATURATION

Effet de la maturation du bois périphérique

Durant quelques jours à quelques semaines après sa formation, le bois subit une phase dite "de maturation" au cours de laquelle il a tendance à se déformer (en général, il tend à se raccourcir dans la direction du fil). Le nouveau bois étant collé au noyau de bois ancien beaucoup plus rigide, ces déformations sont empêchées, si bien que le bois nouvellement formé se trouve tendu. Cette contrainte de maturation induite dans le bois périphérique est équilibrée par un incrément de compression réparti sur le cœur, de sorte que la somme des tensions induites et des incréments de compression se compensent. Comme pour les contraintes de support, pour comprendre le profil de contraintes de maturation, il faut tenir compte de l'intégration au cours

du temps de ce phénomène et du fait que les cerne internes ont participé à compenser la mise en tension de toutes les couches de bois alors que les cerne externes ne participent qu'à compenser celle des couches les plus récentes.

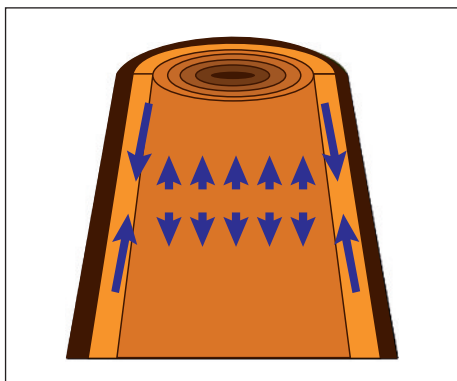


FIGURE 5
EFFET DE LA MATURATION
D'UN CERNE DE CROISSANCE

La mise en tension de la nouvelle couche de bois périphérique est compensée par un incrément de contrainte de compression uniformément répartie dans la section.

L'état de contrainte du bois en un point donné de la grume dépend donc de son histoire de chargement et de maturation, qui peut être décrit comme suit :

- le bois est formé en périphérie libre de contraintes ;
- peu après sa formation, la maturation induit une contrainte de tension dans ce bois périphérique ;
- dans les années qui suivent, l'augmentation de poids induit des incréments de compression ;
- et la maturation des nouvelles couches de bois a un effet similaire à celui de l'augmentation de poids.

Rôle pour le contrôle de l'orientation de l'arbre

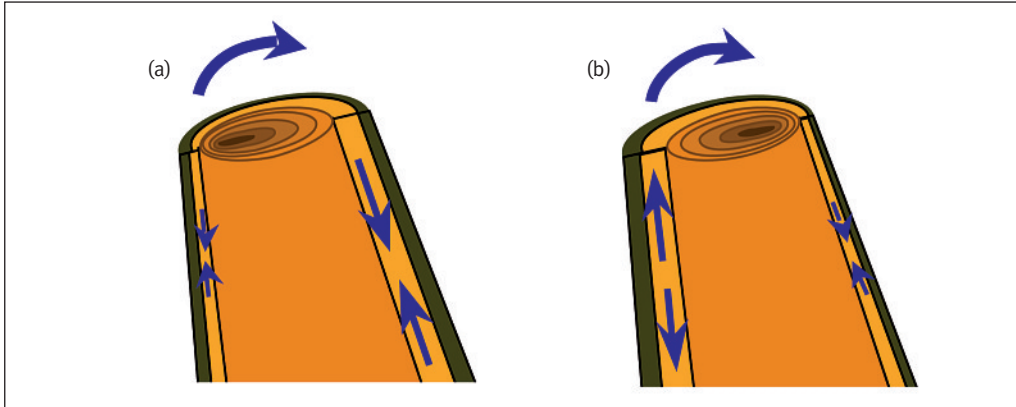
Pour compenser ou prévenir les déséquilibres mécaniques (inclinaison du tronc ou excentrement du houppier), l'arbre est capable de développer de façon asymétrique un bois à forte contrainte de maturation, dit bois de réaction, souvent accompagné d'un excentrement de la croissance diamétrale. Chez les feuillus, un bois à forte tension est créé du côté supérieur (bois de tension) alors que, chez les résineux, c'est un bois à forte compression qui est créé du côté inférieur

(bois de compression). Dans les deux cas, ceci permet de générer un couple de flexion (Alméras *et al.*, 2005) qui s'oppose à celui induit par l'augmentation de poids propre, et donc de contrôler la forme et l'orientation du tronc (figure 6, ci-dessous).

FIGURE 6 MÉCANISME DE CONTRÔLE DE L'ORIENTATION PAR MISE EN PLACE DE CONTRAINTES DE MATURATION ASYMÉTRIQUES :

- (a) cas d'un feuillu, avec excentrement et formation de bois de tension du côté supérieur ;
 (b) cas d'un résineux, avec excentrement et formation de bois de compression du côté inférieur.

Dans les deux cas, l'asymétrie de la contrainte induite génère un couple qui s'oppose à l'effet de l'augmentation de poids, et permet donc de limiter l'affaissement du tronc, voire de le redresser.



Ce type de réaction modifie le profil des contraintes dans le tronc, d'une part en modifiant la contrainte initiale induite dans le bois juste après sa formation, et d'autre part en créant des mouvements de flexion, et donc des gradients de contrainte dans le tronc, qui s'intègrent au cours de la croissance d'une façon similaire aux mouvements de flexion dus au poids.

Simulation de profils de contraintes de maturation et de croissance

La figure 7 montre les profils de contraintes de croissance simulés dans deux configurations. Le premier cas est celui d'un arbre équilibré, dont le bois subit une contrainte de maturation correspondant à une contraction de 0,05 %. L'autre cas simulé est celui d'un feuillu déséquilibré dans ses stades jeunes et réagissant de façon continue au cours de sa croissance par la production unilatérale de bois de tension ayant une tension induite 4 fois plus intense que le bois normal.

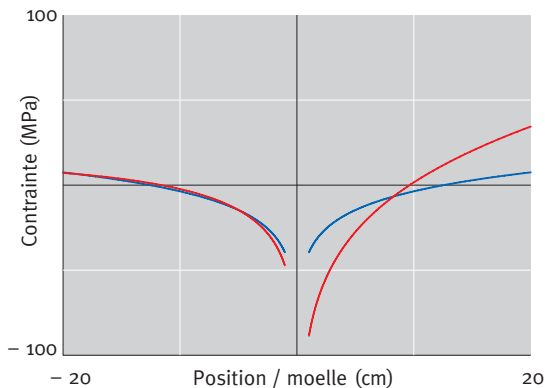


FIGURE 7
PROFILS DE CONTRAINTE DE CROISSANCE
(support + maturation)
LE LONG D'UN DIAMÈTRE,
SIMULÉS POUR UN TRONC ÉQUILIBRÉ (—)
ET UN TRONC DE FEUILLU INCLINÉ
QUI RÉAGIT (—)

Les positions diamétrales sont indiquées par rapport à la moelle.

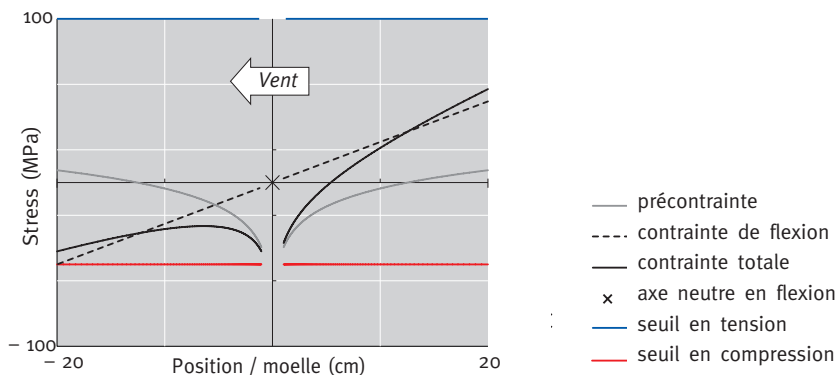
Les profils de contraintes (figure 7) montrent dans les deux cas une très forte compression à cœur, bien plus importante que celle induite par le poids seul (voir figure 3, p. 753), et un gradient de contraintes du cœur vers la périphérie, la contrainte devenant une tension dans les zones périphériques. Dans le cas de l'arbre qui réagit à un déséquilibre, on a à la fois une plus forte tension périphérique (liée à la maturation du bois de tension), et une plus forte compression à cœur de ce côté, liée au mouvement de redressement progressif.

Conséquences sur la résistance à la flexion

Les niveaux des contraintes simulés au cœur de l'arbre sont élevés, et comparables au seuil d'endommagement du bois vert en compression (Armstrong *et al.*, 1984). Ils peuvent même dépasser ce seuil d'endommagement, menant à une forte dégradation mécanique du cœur de l'arbre (Ferrand, 1983). Cependant, cet état de précontrainte ne pénalise pas la résistance de la tige à des flexions extérieures, car celles-ci sollicitent principalement le bois situé en périphérie. L'effet d'une flexion se superposant aux précontraintes, pour le cas d'un arbre équilibré, est illustré sur la figure 8, ci-dessous. Non seulement la compression à cœur n'est pas pénalisante, mais la présence d'une précontrainte de tension aux bords améliore même la résistance du tronc aux flexions : dans le cas illustré, la contrainte totale reste en deçà du seuil d'endommagement en compression, alors que l'effet de la flexion seule aurait amené une structure non-précontrainte à atteindre ce seuil.

FIGURE 8 EFFET D'UNE FLEXION D'ORIGINE EXTÉRIEURE (VENT PAR EXEMPLE) SUR UN ARBRE ÉQUILIBRÉ PRÉCONTRAIT

Les précontraintes de croissance se superposent aux contraintes induites par la flexion, mais sans augmenter la valeur de la contrainte maximale atteinte en compression. Au contraire, la présence de précontraintes permet même d'améliorer la résistance à la flexion puisque la contrainte maximale de compression est inférieure à celle qu'aurait induite une flexion sur une structure non précontrainte.



Cas d'une réaction avec excentrement de la croissance diamétrale

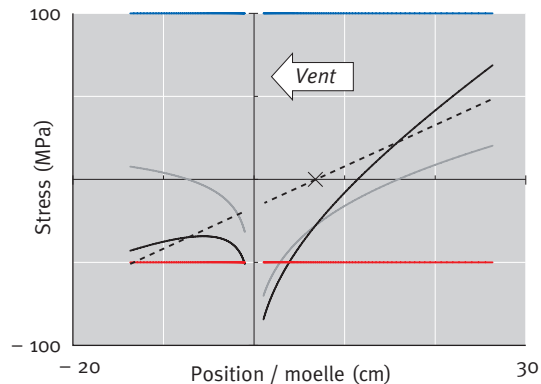
La différenciation de bois de réaction est très souvent accompagnée d'un excentrement de la croissance diamétrale, les cernes étant plus larges du côté où se trouve le bois de réaction. Ce cas a été simulé en supposant que les accroissements étaient deux fois plus importants du côté en réaction que de l'autre côté (figure 9, p. 757). La précontrainte de compression est maximale au cœur biologique de l'arbre, qui correspond aux parties les plus anciennes, mais qui n'est plus

le centre géométrique de la section. Dans ce cas, une flexion supplémentaire va induire au niveau de ce cœur des incréments non négligeables de contraintes qui, se cumulant au haut niveau de précontrainte, font apparaître un risque important d'endommagement.

FIGURE 9 EFFET D'UNE FLEXION D'ORIGINE EXTÉRIEURE (VENT PAR EXEMPLE)
SUR UN ARBRE DÉSÉQUILIBRÉ QUI RÉAGIT PAR LA PRODUCTION DE BOIS DE TENSION
AVEC UNE CROISSANCE DIAMÉTRALE EXCENTRÉE

Les précontraintes de croissance atteignent au niveau du cœur des valeurs de compression qui peuvent dépasser le seuil d'endommagement. Quand une flexion se superpose, le cœur étant excentré, des contraintes supplémentaires non négligeables sont générées à ce niveau et le risque d'endommagement peut devenir important.

- précontrainte
- - - - - contrainte de flexion
- contrainte totale
- x axe neutre en flexion
- seuil en tension
- seuil en compression



Risque d'endommagement interne : une explication pour les “coups de vent” ?

La simulation des profils de précontraintes d'arbres déséquilibrés réagissant de façon prolongée a fait apparaître des risques d'endommagement interne pour deux raisons :

- le niveau de précontrainte en compression atteint des valeurs très fortes au cœur, proches des limites d'endommagement du matériau et même susceptibles de les dépasser ;
- si la réaction est excentrée, la non-concordance entre le centre biologique de l'arbre et son centre géométrique fait que des flexions d'origine extérieure peuvent solliciter ces zones déjà très fortement pré-comprimées.

Dans la réalité, le premier point est probablement atténué par le comportement viscoélastique du bois (Bardet et Gril, 2002), qui entraîne une relaxation des contraintes qui peut être importante sur le long terme. Il est cependant observé dans des cas extrêmes (Ferrand, 1983). En revanche, les flexions dues au vent sont des événements très rapides au cours desquels la relaxation n'a pas le temps de se produire : le second point correspond donc à un danger réel d'endommagement interne pour l'arbre. Ce mécanisme pourrait constituer une explication à l'origine des “coups de vent”, c'est-à-dire des zones internes endommagées parfois observées sur les gros arbres (photo 2, p. 758).

CONCLUSIONS

Les contraintes de croissance résultent du comportement du bois lors de sa maturation, de la nécessité pour l'arbre de supporter son poids propre, et du mode particulier d'accumulation des contraintes mécaniques lors de la croissance du tronc. Du point de vue de l'arbre, elles sont clairement avantageuses, en lui permettant à la fois d'optimiser sa résistance aux chargements exté-



Photo 2 “Coup de vent” dans du bois d’Angélique (*Dicorynia guianensis*, à gauche) et de Saint-Martin (*Hymenolobium spp.* à droite). Ces zones de ruptures en compression, qui ont eu lieu à l’intérieur du tronc sur pied, résultent hypothétiquement d’un trop fort niveau de contraintes de croissance.

rieurs et de contrôler sa forme. Ce dernier point est d’une importance particulière : les modèles biomécaniques montrent en effet que, compte tenu de leur fort rapport d’élancement, les troncs d’arbres forestiers ne pourraient pousser verticalement de façon durable sans un mécanisme leur permettant de corriger leur forme (Alméras et Fournier, 2009). En l’absence de contraintes de maturation, toute perturbation mécanique de l’orientation du tronc mènerait inévitablement à des mouvements de flexion qui s’accroîtraient rapidement lors de la croissance, créant un affaissement progressif de l’arbre. Une perturbation (déséquilibre du houppier, inclinaison), même de faible intensité, doit être corrigée rapidement pour permettre la croissance verticale. Ceci explique qu’on trouve des zones à fortes contraintes de maturation aussi bien dans les arbres penchés que dans les arbres droits : ce sont justement ces contraintes qui ont permis à ces derniers de se maintenir droits au cours de leur croissance.

L’apparition des contraintes de croissance est déterminée à la fois par les conditions de croissance de l’arbre (en particulier son degré de perturbation mécanique, qui détermine ses besoins de réorientation) et par la génétique (certaines espèces ou provenances développent des contraintes plus importantes que d’autres en réponse à ce besoin de réorientation). Les résultats de Ferrand (1983) indiquent que, chez le Hêtre, les contraintes de croissance peuvent être significativement réduites par une sylviculture adéquate. L’observation d’une corrélation négative entre la surface du houppier et les contraintes de croissance l’ont amené à préconiser pour cette espèce une sylviculture en futaie (Ferrand, 1983). Ces résultats ont été confirmés par une étude ultérieure (Loup et Thibaut, 2001). Par ailleurs, lors de cette dernière étude, les relations entre le niveau de contrainte et divers indicateurs géométriques de l’arbre ont été étudiées. Il apparaît que le niveau de contrainte n’est pas clairement relié à la forme du tronc (inclinaison ou sinuosité), mais est positivement corrélé au rapport hauteur/diamètre et à la dissymétrie du houppier. Ces deux caractères sont des sources d’instabilité mécanique, ce qui explique que les arbres les présentant ont plus fréquemment recours à des réorientations actives par la mise en place de fortes contraintes de maturation. Le lien entre l’instabilité mécanique et la forte réactivité de l’arbre, observé ici au sein d’une espèce, a été aussi constaté entre espèces lors d’une étude plus récente sur une diversité d’espèces tropicales.

La recherche scientifique connaît actuellement des progrès rapides dans la compréhension de l’origine des contraintes de maturation aux échelles microscopique et moléculaire, qui permettent

d'envisager dans le futur une meilleure compréhension de leur déterminisme génétique. À terme, ceci permettra peut-être la production de génotypes avec un niveau de contraintes de croissance inférieur. Néanmoins, la compréhension de la fonction de ces contraintes dans l'arbre nous met en garde sur les possibles conséquences néfastes d'une telle sélection : en réduisant la réactivité de l'arbre, on risque aussi de diminuer la rectitude du tronc, notamment si les pratiques sylvicoles favorisent le développement de troncs élancés ou de houppiers dissymétriques.

Tancrede ALMÉRAS – Joseph GRIL – Delphine JULLIEN
 Laboratoire de Mécanique et Génie civil
 UNIVERSITÉ MONTPELLIER 2
 Place Eugène Bataillon, cc 048
 F-34095 MONTPELLIER CEDEX 5
 (t_almeras@hotmail.com)

Meriem FOURNIER
 UMR INRA-ENGREF LERFOB
 AgroParisTech ENGREF
 14, rue Girardet
 CS 14216
 F-54042 NANCY CEDEX
 (meriem.fournier@engref.agroparistech.fr)

BIBLIOGRAPHIE

- ALMÉRAS (T.), THIBAUT (A.), GRIL (J.). — Effect of circumferential heterogeneity of wood maturation strain, modulus of elasticity and radial growth on the regulation of stem orientation in trees. — *Trees*, vol. 19, 2005, pp. 457-467.
- ALMÉRAS (T.), FOURNIER (M.). — Biomechanical design and long-term stability of trees: morphological and wood traits involved in the balance between weight increase and the gravitropic reaction. — *Journal of Theoretical Biology*, vol. 256, 2009, pp. 370-381.
- ARCHER (R.R.). — Growth stresses and strains in trees / E. Timell editor. — Berlin, Heidelberg, New-York : Springer Verlag, 1986. — 240 p. (Springer Series in Wood Science).
- ARMSTRONG (J.P.), SKAAR (C.), DE ZEEUW (C.). — The effect of specific gravity on several mechanical properties of some world woods. — *Wood Science and Technology*, vol. 18, 1984, pp. 137-146.
- BARDET (S.), GRIL (J.). — Modelling the transverse viscoelasticity of green wood using a combination of two parabolic elements. — *Comptes rendus mécanique*, vol. 330, 2002, pp. 549-556.
- FERRAND (J.-C.). — Les contraintes de croissance et leurs conséquences en termes de sylviculture et de sciage. — *Revue forestière française*, vol. XXXV, n° 5, 1983, pp. 327-339.
- FOURNIER (M.), CHANSON (B.), GUITARD (D.), THIBAUT (B.). — Mécanique de l'arbre sur pied : modélisation d'une structure en croissance soumise à des chargements permanents et évolutifs. 1. Analyse des contraintes de support. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 48, 1991(a), pp. 513-525.
- FOURNIER (M.), CHANSON (B.), THIBAUT (B.), GUITARD (D.). — Mécanique de l'arbre sur pied : modélisation d'une structure en croissance soumise à des chargements permanents et évolutifs. 2. Analyse tridimensionnelle des contraintes de maturation, cas du feuillu standard. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 48, 1991(b), pp. 527-546.
- FOURNIER (M.), CHANSON (B.), THIBAUT (B.), GUITARD (D.). — Mesures des déformations résiduelles de croissance à la surface des arbres, en relation avec leur morphologie. Observations sur différentes espèces. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 51, 1994, pp. 249-266.
- JULLIEN (D.), LAGHDIR (A.), GRIL (J.). — Modelling log-end cracks due to growth stresses: calculation of the elastic energy release rate. — *Holzforschung*, vol. 57, 2003, pp. 407-414.
- LOUP (C.), THIBAUT (B.). — Stress in beech. — Contribution au rapport final du contrat européen FAIR 98-3606, 2001.

LES CONTRAINTES DE CROISSANCE DANS LES TIGES : MODÉLISATION DE LEUR MISE EN PLACE ET DE LEUR FONCTION BIOLOGIQUE (Résumé)

Lors de leur croissance, les arbres accumulent dans leur tronc de fortes contraintes mécaniques qui peuvent être source de difficultés lors de leur exploitation : fentes à l'abattage, fentes ou déformations des planches au sciage. Ces contraintes ont pour origine l'effet du poids propre de l'arbre, et le développement de contraintes "actives" lors de la maturation du bois. Nous exposons ici le mécanisme d'accumulation de ces contraintes au cours de la croissance, qui explique les profils de contrainte particuliers observés dans les troncs. Une attention particulière est portée à expliquer le lien entre ces mécanismes et leurs fonctions biologiques. Les contraintes de croissance, si elles sont sources de problèmes pour le forestier ou le scieur, sont utiles aux arbres, en maximisant leur résistance à la flexion, et en leur permettant de se réorienter et de contrôler leur forme. En conclusion, nous montrons en quoi une bonne connaissance des mécanismes en jeu et de leur rôle pour l'arbre peut aiguiller la recherche de solutions concrètes visant à diminuer le niveau de contraintes de croissance des arbres en exploitation.

GROWTH-RELATED STRESSES IN STEMS – MODELLING THEIR DEVELOPMENT AND THEIR BIOLOGICAL FUNCTION (Abstract)

During growth, trees accumulate large mechanical stresses in their trunk. This can cause problems such as log end cracks when felling the tree, and cracks or distortions of the sawn lumber. These stresses originate in the effect of self-weight and the development of active stress during wood maturation. In this paper, we present the mechanism underlying stress accumulation during tree growth, which explains the specific stress profiles observed in trunks. The link between these mechanisms and their biological function is outlined. Growth stresses are a source of problems for the forest managers or the wood industry, but they are useful to trees. They maximize the resistance of the trunk to external loads such as wind, and allow them to reorient their stem and control its shape. As a conclusion, we show how a better knowledge of the biological function of growth stresses could help selecting appropriate practical solutions to reduce the stress level in commercial production.
