



**HAL**  
open science

## Modélisation des contraintes de croissances dans les branches : comparaison de différentes stratégies de maintien postural

Arnoul VAN ROOIJ, Eric Badel, Jean-François Barczi, Yves Caraglio, Tancrede Almeras, Joseph Gril

► **To cite this version:**

Arnoul VAN ROOIJ, Eric Badel, Jean-François Barczi, Yves Caraglio, Tancrede Almeras, et al.. Modélisation des contraintes de croissances dans les branches : comparaison de différentes stratégies de maintien postural. 11èmes journées du GDR 3544 “ Sciences du bois ”, Nov 2022, Nice, France. hal-04825072

**HAL Id: hal-04825072**

<https://hal.science/hal-04825072v1>

Submitted on 7 Dec 2024

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

## Modélisation des contraintes de croissances dans les branches : comparaison de différentes stratégies de maintien postural

VAN ROOIJ Arnoul<sup>1,2</sup>, BADEL Eric<sup>2</sup>, BARCZI Jean-François<sup>3</sup>, CARAGLIO Yves<sup>3</sup>,  
ALMERAS Tancrede<sup>4</sup>, GRIL Joseph<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Université Clermont-Auvergne, CNRS, Institut Pascal, F-63000, Clermont-Ferrand, France

<sup>2</sup> Université Clermont-Auvergne, INRAE, PIAF, F-63000, Clermont-Ferrand, France

<sup>3</sup> AMAP, Univ Montpellier, CIRAD, CNRS, INRAE, IRD, Montpellier, France

CIRAD, UMR AMAP, F-34398 Montpellier, France

<sup>4</sup> LMGC, CNRS, Université of Montpellier, Montpellier, France

[arnoul.van-rooij@inrae.fr](mailto:arnoul.van-rooij@inrae.fr)

**Mots clefs :** biomécanique, branches, dimensionnement, contrainte

### Contexte et objectifs

Pour maintenir leur orientation, les troncs et branches d'arbres mettent en place des contraintes tout au long de leur croissance (Fournier et al. 1994), en réponse à l'augmentation du poids et à la maturation des cellules (rigidification due au processus de polymérisation des composants) (Alméras et Clair 2016). Une tige dispose de deux moyens de contrôler son orientation ; soit en créant une asymétrie dans la distribution des contraintes de maturation entre les faces opposées, soit en créant une asymétrie circonférentielle de croissance que l'on appelle « excentricité ».

Les deux stratégies ont été largement observées chez des troncs inclinés comme des branches. L'objectif de ce travail est de déterminer leur efficacité respective pour le maintien postural de branches. Pour cela, un modèle semi-analytique a été développé, intégrant les deux leviers. Ce modèle a été appliqué à des branches issues de maquettes numériques d'arbres.

### Matériel et Méthodes

#### *Modèle numérique*

Les branches ayant généralement un profil élancé et une variation lente de leur diamètre, la mise en équation du problème a été faite dans le cadre de la théorie des poutres. Le modèle développé est un calcul incrémental semi-analytique effectué au niveau de la section droite pour une position axiale donnée sur l'axe : à chaque pas de temps (correspondant à la création d'un nouveau cerne), l'équilibre des contraintes entre les efforts extérieurs (chargement dû au poids) et intérieurs (maturation des cellules et réaction suite à cette maturation) s'écrit :

$$\begin{cases} \int_0^S \delta\sigma dS + \int_0^{\delta S} \sigma_0 dS = \delta N \\ \int_0^S \delta\sigma x dS + \int_0^{\delta S} \sigma_0 x dS = -\delta M \end{cases} \quad (1)$$

avec  $S$  la section,  $\delta S$  l'incrément de section,  $\delta\sigma$  l'incrément de contrainte dans le bois déjà formé,  $\sigma_0$  la contrainte de maturation générée dans le nouveau bois,  $\delta N$  et  $\delta M$  les incréments en poids et en moment de flexion dus à l'apparition de nouveau bois en aval de la position axiale considérée, et  $x$  la position verticale dans la section droite. Les deux leviers de redressement ont été modélisés comme suit :

- *Excentricité* : chaque section est un disque circulaire dont le centre géométrique peut être décalé par rapport au centre précédent d'une fraction du rayon actuel, que l'on nommera excentricité :

$$O(t) = \int_0^{R(t)} e(r) dr = \bar{e}R(t) \quad (2)$$

avec  $O$  la position du centre géométrique à l'instant  $t$ ,  $R$  le rayon final à l'instant  $t$ ,  $e(r)$  l'excentricité quand la section avait un rayon  $r$ , et  $\bar{e}$  l'excentricité moyenne (intégrant l'ensemble des excentricités précédentes). Dans ce formalisme, une excentricité de 0 correspond à une croissance symétrique centrée, -1 à une croissance dite 'épitrophique' avec tout le bois créé du côté supérieur, 1 à une croissance 'hypotrophique' avec tout le bois créé du côté inférieur.

- *Gradient de maturation* : la dissymétrie des contraintes de croissance a été modélisée par une loi sinusoïdale comme on le trouve assez usuellement dans la littérature (Alméras et Fournier 2009, Hung et al. 2010) :

$$\sigma_0(\theta) = \alpha + \beta \cos(\theta) \quad (3)$$

avec  $\sigma_0$  la contrainte de maturation,  $\theta$  la position circonférentielle de l'élément,  $\alpha$  la contrainte de maturation moyenne et  $\beta$  le gradient de maturation. Ces facteurs sont différents selon que l'arbre est un résineux ou un feuillu. Dans le cas d'un feuillu, le bois sur le côté supérieur sera plus tendu, on l'appelle bois de tension (BT). Pour un résineux, le bois sur le côté inférieur est comprimé, on l'appelle bois de compression (BC). Dans chacun des deux cas, le bois du côté opposé est appelé le bois normal (BN). En appelant  $\sigma_{BT}$  (resp.  $\sigma_{BC}, \sigma_{BN}$ ) la contrainte dans le BT (resp. BC, BN), on obtient :

$$\begin{cases} \text{Feuillu: } \alpha = \frac{\sigma_{BT} + \sigma_{BN}}{2}, \beta = \frac{\sigma_{BT} - \sigma_{BN}}{2} \\ \text{Résineux: } \alpha = \frac{\sigma_{BN} + \sigma_{BC}}{2}, \beta = \frac{\sigma_{BN} - \sigma_{BC}}{2} \end{cases} \quad (4)$$

La résolution du système (1) permet l'obtention du champ de contraintes sur toute la section. Pour alimenter ce modèle, deux données, assez complexes à obtenir expérimentalement, sont nécessaires : l'évolution de l'effort normal  $N(r)$  et du moment de flexion  $M(r)$  tout au long de la croissance de la branche.

#### *Données réalistes de croissance*

Deux maquettes issues du logiciel de développement AmapSim (Barczi et al 2007) nous ont été fournies par l'UMR AMAP : un résineux *Pinus pinaster* et un feuillu *Prunus avium* ; tous deux sur une durée de croissance de 50 ans (Fig. 1). Ces maquettes sont constituées d'axes, décomposés en une suite d'unités de croissance (UC) chacune représentée par un tronçon de cône. Chaque année, de nouvelles UCs apparaissent (croissance primaire) et les UCs existantes augmentent de diamètre (croissance secondaire).

Pour identifier le chargement subit par une UC  $n$  à une position et un temps donnés, la somme des chargements subis par les unités  $k$  « descendantes » de cette UC  $n$  (qui l'accompagnerait dans sa chute si elle venait à rompre) ainsi que la moitié de son propre poids, est effectuée. Puis l'évolution des chargements en fonction du rayon moyen  $R$  de chaque UC a été calculé et approximé sous la forme de lois allométriques :

$$\begin{cases} N = \lambda_N R^{\nu_N} \\ M = \lambda_M R^{\nu_M} \end{cases} \quad (6)$$



Fig. 1 : Maquettes des deux arbres à 50 ans : gauche, *Pinus pinaster* ; droite, *Prunus avium*  
*Scénarii envisagés*

Basé sur une étude de chacune des branches directement fixées sur le tronc, un profil type de branche a été réalisé pour chaque essence. Différents scénarii de croissance ont ensuite été envisagés. Pour chacun d'entre eux, la croissance de la branche est supposée stationnaire (pas de variation de courbure). Assurer un contrôle postural revient donc à maintenir la branche droite. Nous avons étudié l'impact individuel de chacun des stratégies: 1. pas d'excentricité, seul le différentiel de maturation assure le maintien postural, 2. pas de différentiel de maturation, seule l'excentricité assure le maintien postural. Ensuite, des stratégies couplées ont été simulées, en fixant l'un des deux leviers de maintien à une valeur fixe tout au long de la croissance de la branche.

## Résultats et discussion

Par souci de concision, seuls les résultats pour le feuillu sont représentés et discutés ici.

Chacune des deux stratégies isolées est efficace. Dans le cas de la stratégie 1 (Fig. 2, pas d'excentricité, seulement formation du BT), la contrainte dans le bois de tension ne dépasse pas 20 MPa, ce qui reste assez loin des seuils de rupture pour la branche.

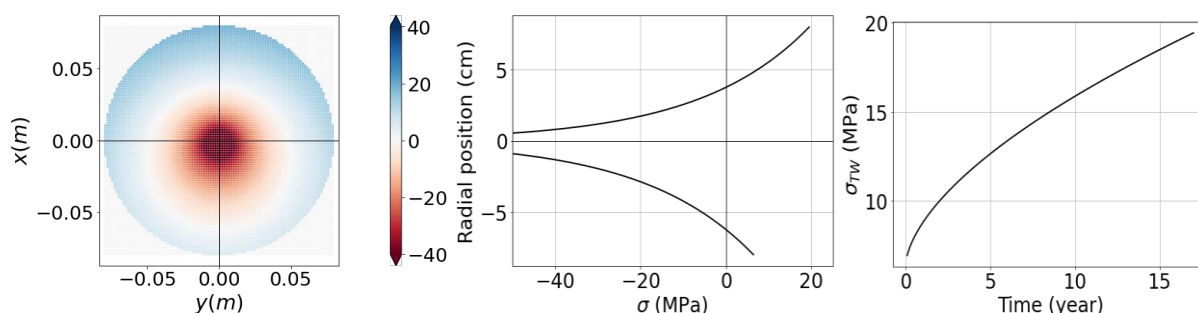


Fig. 2 : Distribution de contraintes lorsque seul le différentiel de maturation assure le maintien postural.  
Gauche : champs de contrainte sur toute la section. Milieu : distribution de la contrainte sur l'axe  $x=0$ .  
Droite : variation de la contrainte dans le BT en fonction du temps.

Dans le cas de la stratégie 2 (Fig. 3), le levier de redressement, l'excentricité, reste, elle aussi, dans une marge largement admissible, comprise entre 0 et 0,6. A titre de comparaison, il est commun de retrouver dans des observations des excentricités supérieures à 0,8 (surtout proche de l'insertion de branches).

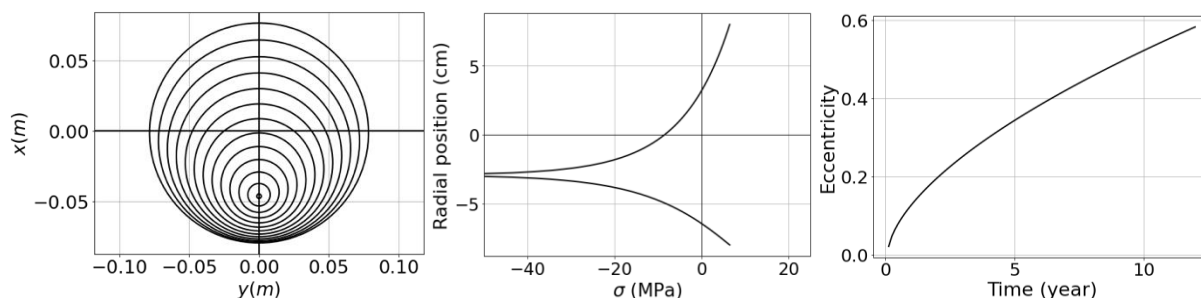


Fig. 3 : Distribution de contraintes lorsque seule l'excentricité assure le maintien postural. Gauche : Excentricité sur l'ensemble de la section. Milieu : distribution de la contrainte sur l'axe  $x=0$ . Droite : variation de l'excentricité en fonction du temps.

Dans le cas des stratégies combinées (non présentées ici mais présentées dans le poster), on remarque que plus il y a de place pour le bois de tension (et donc plus la croissance est excentrée sur la partie supérieure), moins le bois de tension a besoin d'être fort, et ce quelle que soit la stratégie utilisée. Ces deux leviers peuvent donc avoir un effet positif l'un sur l'autre. Le cas du résineux est quant à lui plus complexe du fait que  $\sigma_{BC}$  et  $\sigma_{BN}$  sont de signes opposés.

### Conclusions et perspectives

Dans le cas du feuillu, nous avons donc vu que chacune des stratégies isolées permet d'assurer l'orientation de la branche. Dans la nature cependant, les deux stratégies sont très souvent associées, ce qui pose la question de la nécessité et du rôle mécanique relatif de chacun de ces leviers. Cela montre aussi que la mécanique liée au poids propre n'est pas le seul déterminant qui permet à une branche de se dimensionner, mais qu'il est important de prendre d'autres traits en compte (hydraulique, notion de biomasse, résistance aux sollicitations du vent, etc).

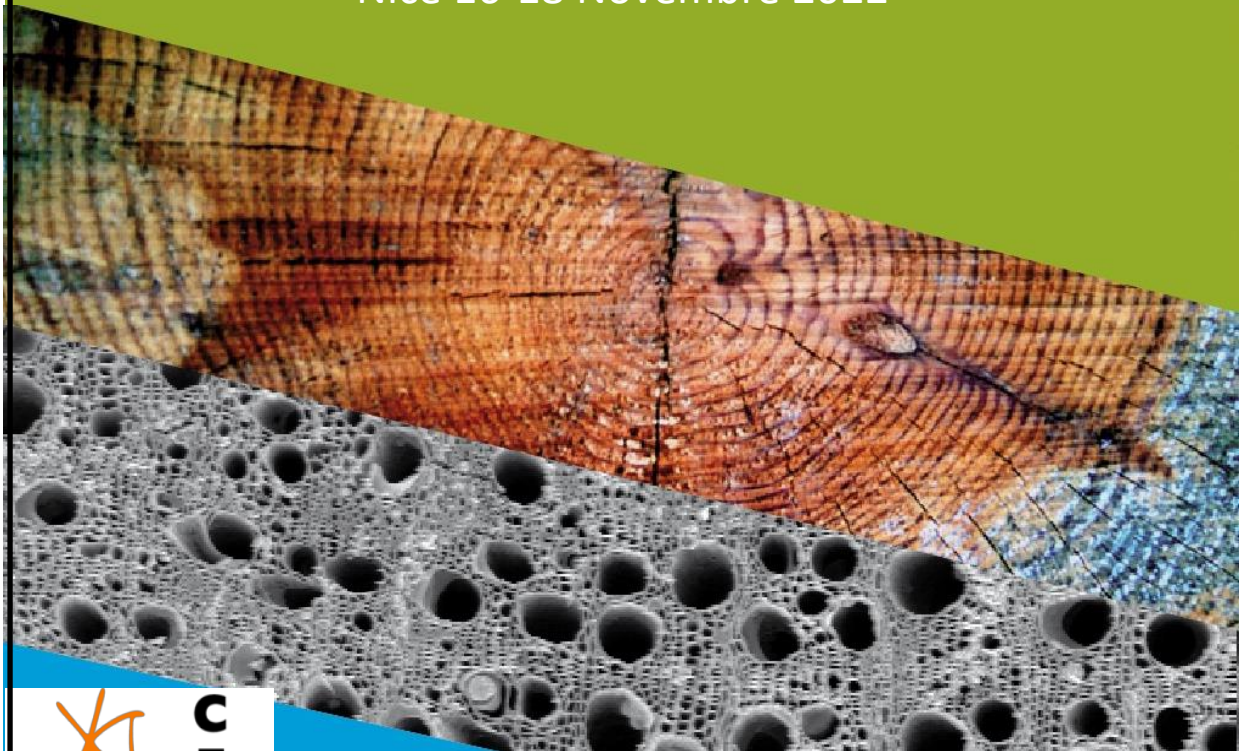
De plus, le modèle proposé trouve ses limites dans la loi de comportement choisie : une loi élastique homogène sur toute la section. Il pourrait être amélioré en prenant en compte les gradients de rigidité (qui sont différents entre le BT et le BN), ainsi qu'en imposant un seuil de déformation plastique pour les cellules.

### Références

- T. Alméras and B. Clair. Critical review on the mechanisms of maturation stress generation in trees. *Journal of The Royal Society Interface*, 13(122):20160550, 2016.
- T. Alméras and M. Fournier. 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*, 256(3):370–381, 2009. ISSN 0022-5193
- J.-F. Barczi, H. Rey, Y. Caraglio, P. de Reffye, D. Barthélémy, Q. X. Dong, and T. Fourcaud. AmapSim: A Structural Whole-plant Simulator Based on Botanical Knowledge and Designed to Host External Functional Models. *Annals of Botany*, 101(8):1125–1138, 09 2007. ISSN 0305-7364
- M. Fournier, H. Baillères, and B. Chanson. Tree biomechanics: growth, cumulative prestresses, and reorientations. *Biomimetics*, 2(3):229–251, 1994.
- Y.-S. Huang, L.-F. Hung, and L.-L. Kuo-Huang. Biomechanical modeling of gravitropic response of branches: roles of asymmetric periphery growth strain versus self-weight bending effect. *Trees*, 24(6):1151–1161, 2010. ISSN 1432-228.

# 11èmes Journées Scientifiques du GDR3544 Sciences du bois

Nice 16-18 Novembre 2022



UNIVERSITÉ  
CÔTE D'AZUR 



**GDR** Groupement  
de recherche  
**Sciences du bois**

## Actes

Coordination et édition: Eric Badel (PIAF), Joseph Gril (Institut Pascal), Isabelle Théry-Parisot (CEPAM)