

Projet de modèle cellulaire 3D de cambium pour étudier l'influence du stress mécanique

Félix Hartmann¹, Christophe Godin², Guillaume Cerutti²,
Bruno Moulia¹, Éric Badel¹

¹Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, Clermont-Ferrand, France,

²Laboratoire Reproduction et Développement des Plantes, Université de
Lyon, ENS de Lyon, UCB Lyon 1, CNRS, INRAE, INRIA, Lyon, France

Xylo2022, Champenoux, 6 juillet 2022

Diversité des modèles de formation du bois: pourquoi, avec quoi, comment ?

Objectifs du modèle

Foresterie
Dendroclimatologie
Compréhension des
mécanismes

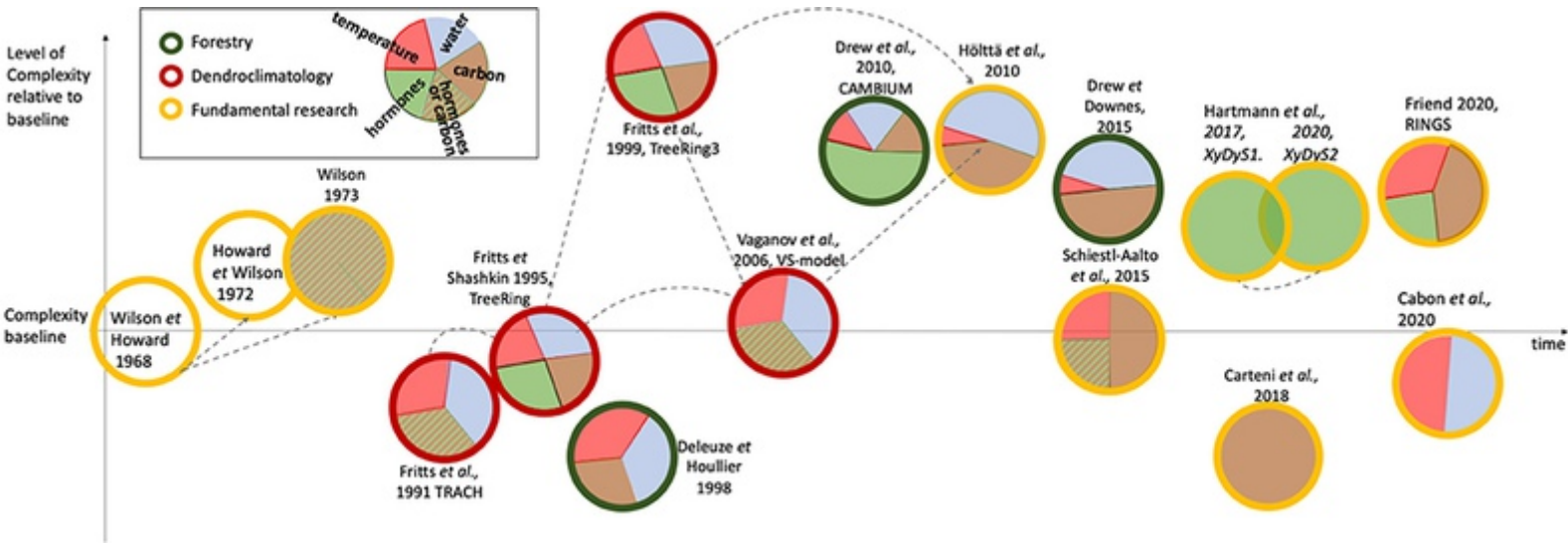
Facteurs pris en compte

Température
Eau
Carbone
Hormones

À quelle échelle

File radiale de cellules
Section ou secteur angulaire

La marche des modèles



d'après Annemarie Eckes-Shephard et al. (2022) *Frontiers in Plant Science*

Le modèle XyDyS2

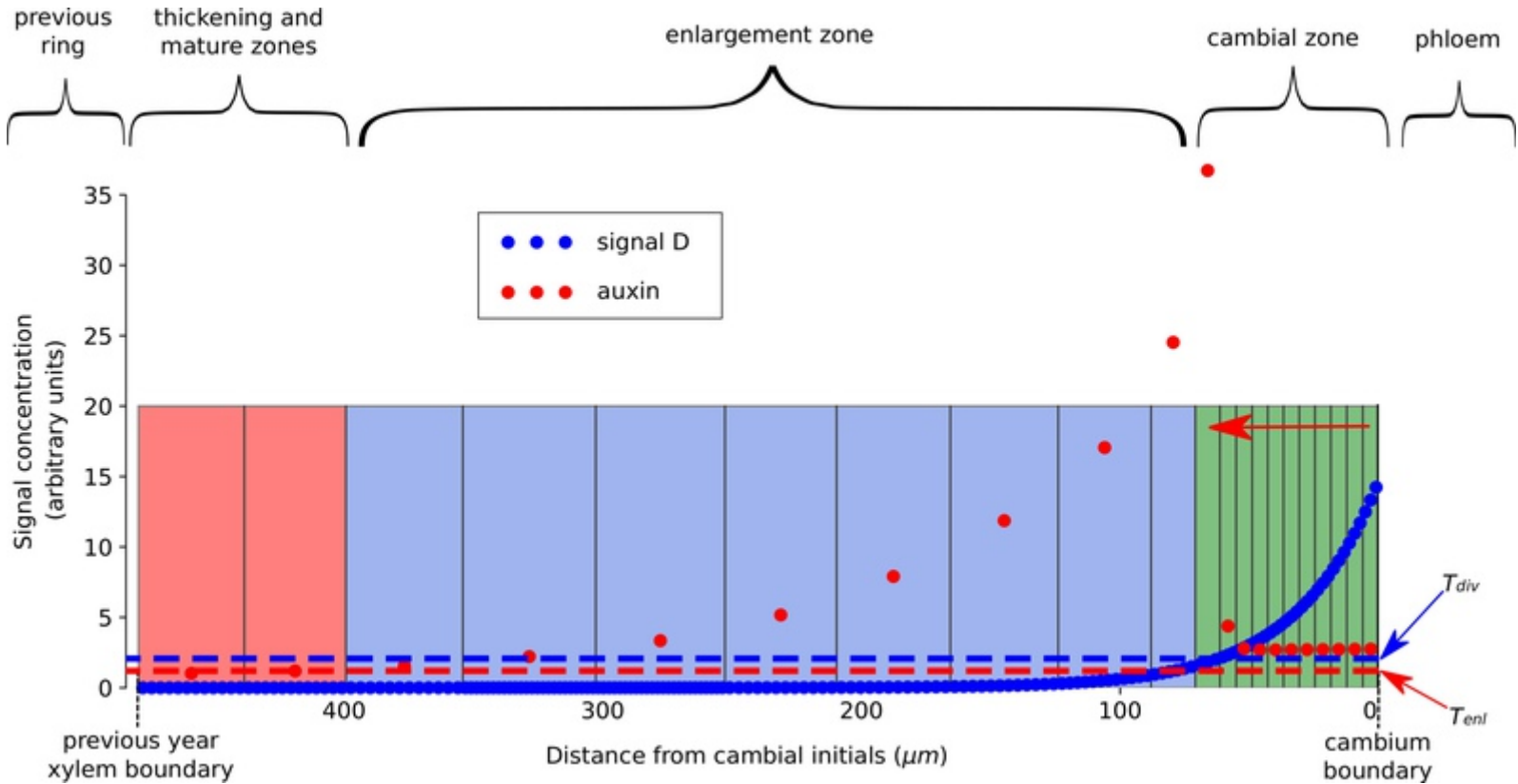
Caractéristiques de XyDyS2:

- Plutôt orienté vers la compréhension des mécanismes de régulation de la xylogénèse, surtout internes au cambium.
- Pilotage par deux hormones : l'auxine et une hormone diffuse non spécifiée (possiblement une cytokinine ou un peptide).
- Une seule file radiale modélisée.
- Division, élargissement, mais pas épaississement des parois.

Quelques hypothèses :

- L'hormone diffuse détermine la zone de division.
- L'auxine fixe les taux d'expansion cellulaire.
- Les transporteurs actifs d'auxine (PIN) ne sont présents que dans les cellules division.
- L'auxine rétroagit positivement sur la quantité de PIN.

Un schéma



Les non-dits de XyDyS

Les hypothèses implicites de XyDyS2 :

- Pas de stress hydrique : la turgescence n'est jamais limitante.
- Les fluctuations de diamètre jour/nuit ne jouent pas de rôle dans la croissance.
- Pas de limitation ni de stimulation par les tissus externes : l'écorce suit la croissance cambiale.
- Chaque file radiale est indépendante des autres.
- Toutes les divisions sont périclines.

Un pas de côté vers la croissance des graines

Endosperm turgor pressure both promotes and restricts seed growth and size

Audrey Creff,^{1†} Olivier Ali,^{1*†} Vincent Bayle¹, Gwyneth Ingram^{1*}, Benoit Landrein^{1*}

¹ Laboratoire Reproduction et Développement des Plantes, Univ Lyon, ENS de Lyon, UCB Lyon 1, CNRS, INRA, F-69342, Lyon, France 69364 LYON Cedex 07, France.

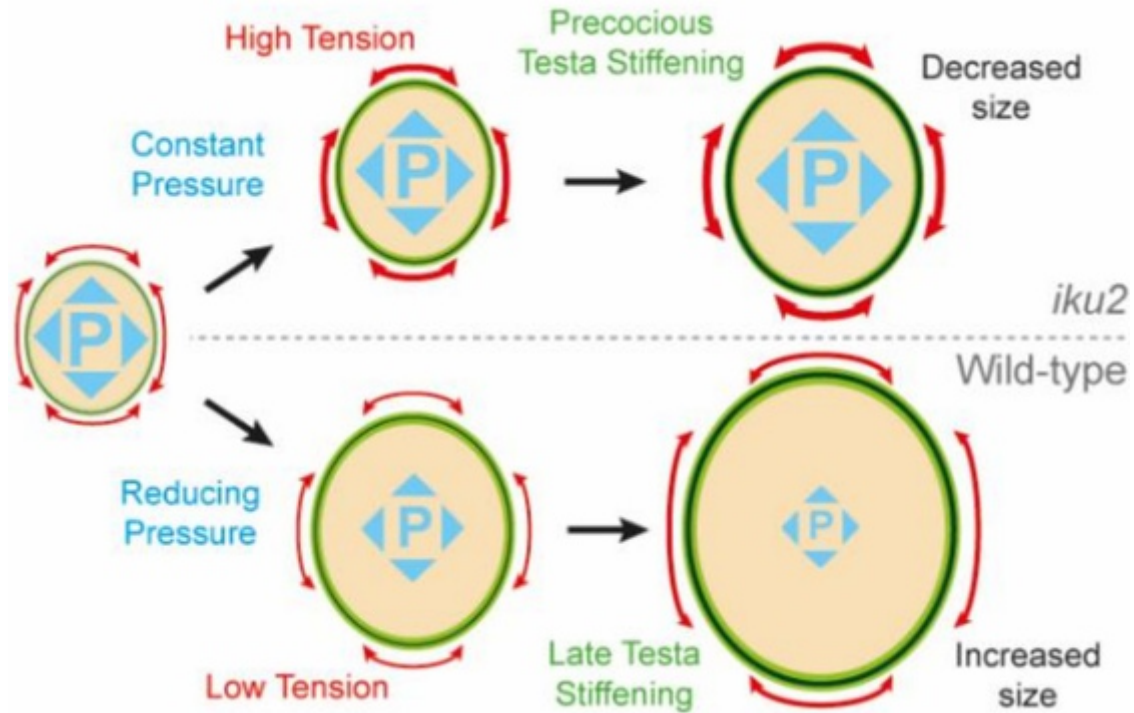
† These authors contributed equally to this work.

* To whom correspondence should be addressed. e-mail: olivier.ali@inria.fr , gwyneth.ingram@ens-lyon.fr , benoit.landrein@ens-lyon.fr

Abstract:

Organ size depends on complex biochemical and mechanical interactions between cells and tissues. Here, we investigate the control of seed size, a key agronomic trait, by mechanical interactions between two compartments: the endosperm and the testa. By combining experiments with computational modelling, we tested an incoherent mechanical feedforward loop hypothesis in which pressure-induced stresses play two antagonistic roles; directly driving seed growth, but indirectly inhibiting it through mechanosensitive stiffening of the seed coat.

Un pas de côté vers la croissance des graines



Un pas de côté vers la croissance des graines

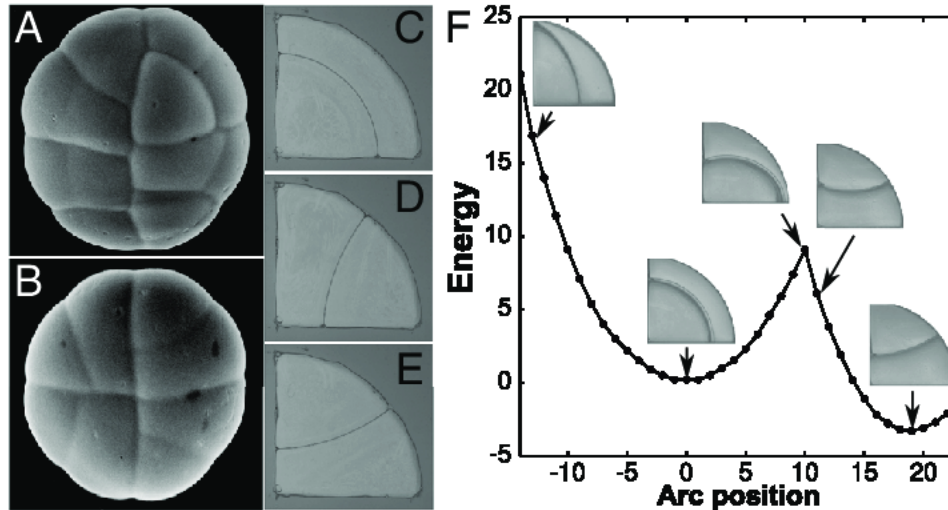
Le double rôle de la testa (spermoderme) :

- Protection de l'embryon.
- Régulation de la croissance de la graine.

Mais tout ce qui d'abord protégeait le tendre germe le gêne aussitôt que la germination s'accomplit ; et aucune croissance n'est possible qu'en faisant éclater ces gaines, ce qui l'emmailotait d'abord.

André Gide, *Les Nouvelles Nourritures*

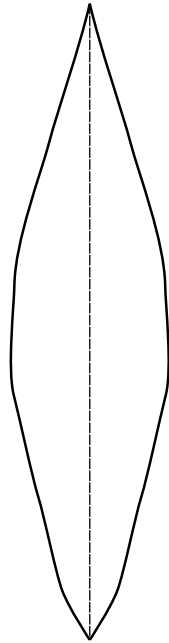
Le choix du plan de division cellulaire



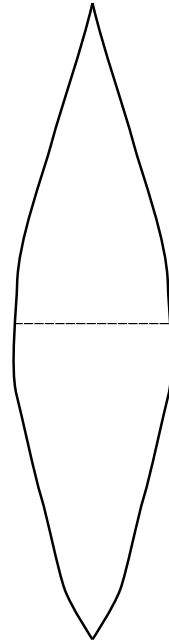
Règle de division d'Errera, revisitée par Besson et Dumais

Lorsqu'une cellule se divise symétriquement, elle choisit un plan de division parmi un ensemble de configurations d'aire minimale, selon une loi de probabilité qui diminue avec l'aire.

Les trachéides contre Errera



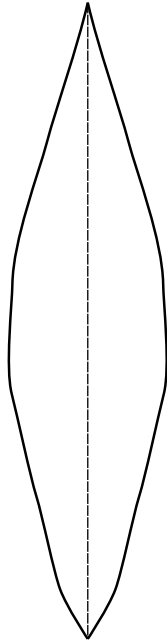
division
longitudinale



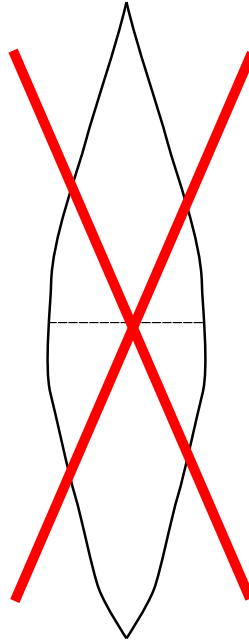
division
transverse

Les deux types de division sont compatibles avec la règle d'Errera–Besson–Dumais, mais la division transverse est *a priori* beaucoup plus probable.

Les trachéides contre Errera



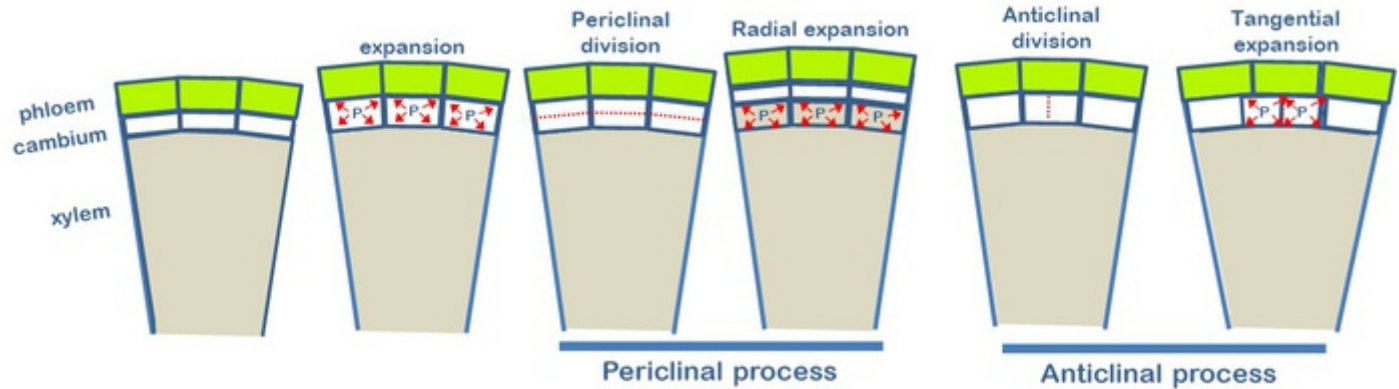
division
longitudinale



division
transverse

Mais seule la division longitudinale est observée.

Division péricline *versus* anticline



L'alternance entre divisions périclines et anticlines doit être finement régulée pour assurer la continuité du tissu avec l'augmentation de la circonférence. Sur quoi repose cette régulation ?

L'hypothèse d'un signal mécanique

PNAS

Cell division plane orientation based on tensile stress in *Arabidopsis thaliana*

Marion Louveaux^{a,b}, Jean-Daniel Julien^{a,b,c}, Vincent Mirabet^{a,b}, Arezki Boudaoud^{a,b,1}, and Olivier Hamant^{a,b,1}

^aLaboratoire Reproduction et Développement des Plantes, Université de Lyon, Ecole Normale Supérieure (ENS) de Lyon, Université Claude Bernard (UCB) Lyon 1, CNRS, Institut National de la Recherche Agronomique, F-69342 Lyon, France; ^bLaboratoire Joliot-Curie, CNRS, ENS de Lyon, UCB Lyon 1, Université de Lyon, 69364 Lyon, Cedex 07, France; and ^cLaboratoire de Physique, CNRS, ENS de Lyon, UCB Lyon 1, Université de Lyon, 69364 Lyon, Cedex 07, France

Edited by Richard Scott Poethig, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, and approved May 23, 2016 (received for review January 14, 2016)

Cell geometry has long been proposed to play a key role in the orientation of symmetric cell division planes. In particular, the recently proposed Besson–Dumais rule generalizes Errera's rule and predicts that cells divide along one of the local minima of plane area. However, this rule has been tested only on tissues with

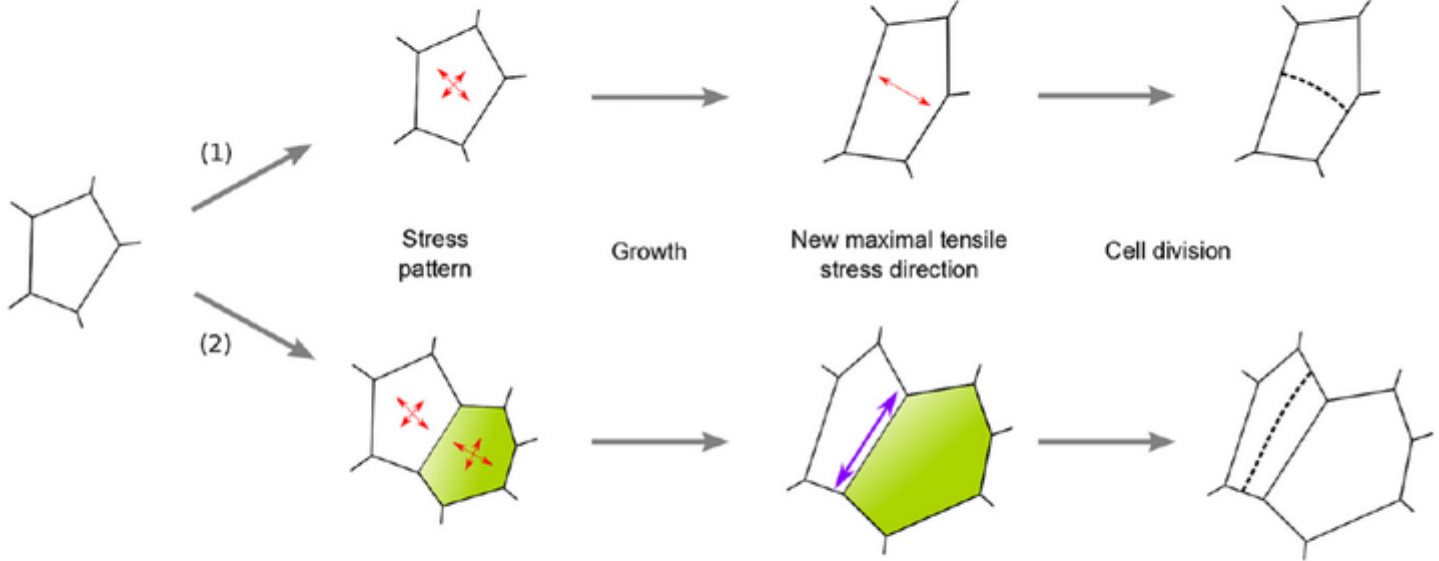
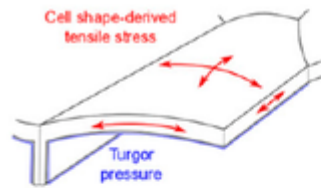
Arabidopsis shoot apical meristem (SAM), a dome-shaped group of dividing cells that generates every aerial organ. Although Errera's rule described the highest percentage of divisions, neither Hofmeister's, nor Errera's, nor Sachs' rules fully described all of the divisions at the SAM (7).

Nouvelle règle d'orientation du plan de division

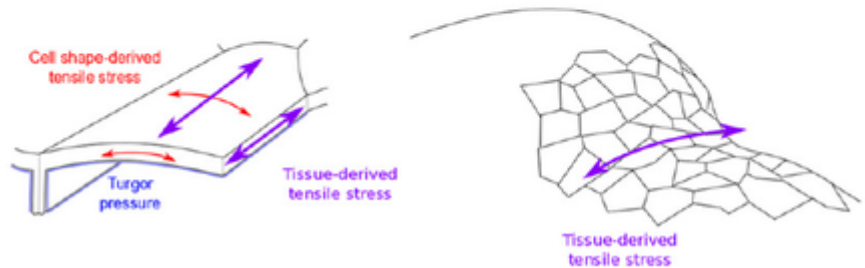
Le plan de division s'aligne sur la direction de tension maximale.
Deux situations possibles :

- Champ de stress isotrope dans le tissu : la direction de tension maximale est dictée par la géométrie de la cellule et coïncide avec la règle d'Errera.
- Champ de stress anisotrope dans le tissu : la direction de tension maximale peut différer de la direction de division prédite par la règle d'Errera.

(1) Mechanical stress pattern
 derived from **cell geometry**
(tissue with isotropic shape)



(2) Mechanical stress pattern
 derived from anisotropic
tissue geometry



Une hypothèse à tester

Hypothèse

Le plan de division d'une cellule de cambium s'aligne sur une direction principale du champ local de stress (ou de déformation).

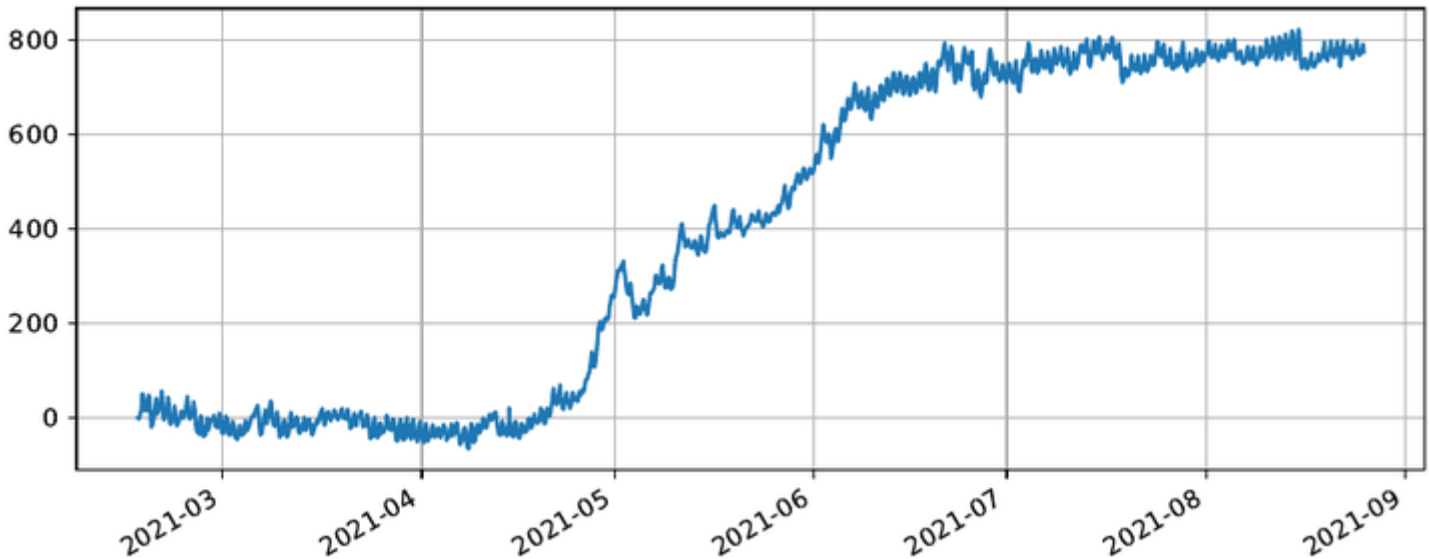
Cette hypothèse permet-elle d'expliquer la structure cellulaire très régulière du bois et la répartition entre divisions périclines et anticlines ?

Bref, on va faire un modèle avec de la mécanique !

- modèle cellulaire
- restreint à un secteur angulaire d'une section transverse du tronc
- cambium + xylème en différenciation + phloème
- prise en compte des flux d'eau pour calculer l'équilibre osmo-mécanique
- d'abord 2D, puis extension 3D longi avec trois couches de cellules pour prendre en compte la croissance intrusive
- périodes simulées de 2-3 mois, pour avoir suffisamment de division
- conditions aux limites radiales issues du modèles et des manips de Tancredi et Bruno
- conditions aux limites longi imitant le cycle journalier d'évapo-transpiration

Validation du modèle

- comparaison avec des courbes de dendromètres LVDT pour valider le calcul de l'équilibre osmo-mécanique



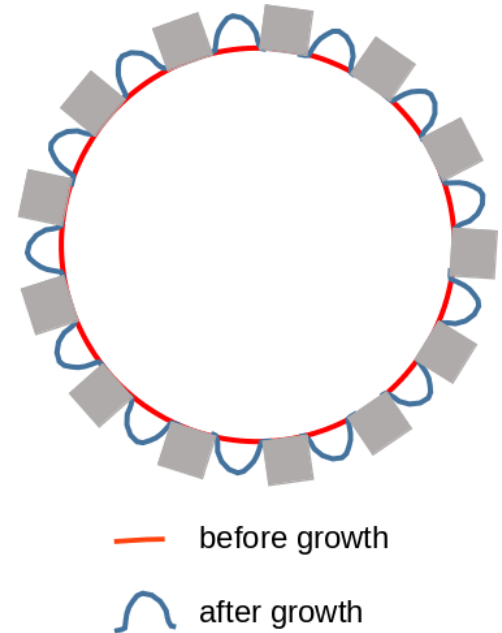
Courbe obtenue par Nicolas Dusart.

Validation du modèle

- test de différentes règles de division basées sur les champs de contraintes et de déformations, et comparaison avec les patrons de division observés dans le cambium

Validation du modèle

- comparaison avec des situations mécaniquement perturbées, telles qu'une blessure ou des applications localisées de pression



Merci pour votre attention !

References

- S. Besson and J. Dumais. Universal rule for the symmetric division of plant cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(15):6294–9, apr 2011. ISSN 1091-6490. doi:10.1073/pnas.1011866108.
- A. Creff, O. Ali, V. Bayle, G. Ingram, and B. Landrein. Endosperm turgor pressure both promotes and restricts seed growth and size. *bioRxiv*, 2021. doi:10.1101/2021.03.22.436392. URL <https://www.biorxiv.org/content/early/2021/03/22/2021.03.22.436392>.
- A. H. Eckes-Shephard, F. C. Ljungqvist, D. M. Drew, C. B. K. Rathgeber, and A. D. Friend. Wood formation modeling – a research review and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 13, 2022. ISSN 1664-462X. doi:10.3389/fpls.2022.837648.
- L. Errera. Sur une condition fondamentale d'équilibre des cellules vivantes. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences*, 103:822–824, 1886.
- F. P. Hartmann, C. B. K. Rathgeber, M. Fournier, and B. Moulia. Modelling wood formation and structure: power and limits of a morphogenetic gradient in controlling xylem cell proliferation and growth. *Annals of Forest Science*, 74(1):14, 2017. ISSN 1297-966X. doi:10.1007/s13595-016-0613-y.
- F. P. Hartmann, C. B. K. Rathgeber, E. Badel, M. Fournier, and B. Moulia. Modelling the spatial crosstalk between two biochemical signals explains wood formation dynamics and tree-ring structure. *Journal of Experimental Botany*, 72(5):1727–1737, 2021. ISSN 0022-0957. doi:10.1093/jxb/eraa558.
- M. Louveaux, J.-D. Julien, V. Mirabet, A. Boudaoud, and O. Hamant. Cell division plane orientation based on tensile stress in *Arabidopsis thaliana*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(30):E4294–E4303, 2016. ISSN 0027-8424. doi:10.1073/pnas.1600677113.