



LERFOB



AgroParisTech
Centre de Nancy

Biomécanique des arbres:

Comment ils tiennent debout si longtemps ?
Pourquoi ça concerne les hommes de la forêt et du bois ?

Meriem Fournier

Prix Jean Dufreynoy 2014

*Ingénieure Générale des Ponts, des Eaux et des Forêts
Docteur de l'Institut National Polytechnique de Lorraine,
Habilitation à diriger des Recherches obtenue à l'Université de Bordeaux I*

*Exposé devant la section « forêts et filière bois » de l'Académie d'Agriculture
Le 8/10/2014*



INRA
SCIENCE & IMPACT



Plusieurs générations

Daniel Guitard



Hans Kübler

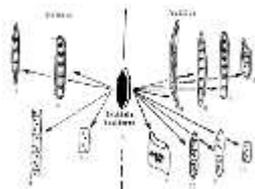
Bernard Thibaut



André Chardin

Hubert Polge

René Keller



Bob Archer

Pierre Bouvarel

T. Okuyama Sense

Claude Millier



...

...

Joseph Gril



Bruno Moulia



Thierry Constant

Jacques Beauchêne

H. Yamamoto Sense



T. Speck



B. Lachenbruch

Rosario Sierra de Grado

...

Tancrede Alméras



Cyrille Rathgeber



Rémi Thomas



Nadine Amusant



Bruno Clair
Catherine Coutand
Valérie Grzeskowiak

...

...

Julien Ruelle



Jana Dlouhà



Gaëlle Jaouen



Mathieu Dassot
Vivien Bonnesoeur
Nicolas Bilot
Félix Hartmann
Henri Cuny
Julie Bossu

...

...

Aux interfaces

Recherche

L'amour du bois

La passion de l'arbre

Bio

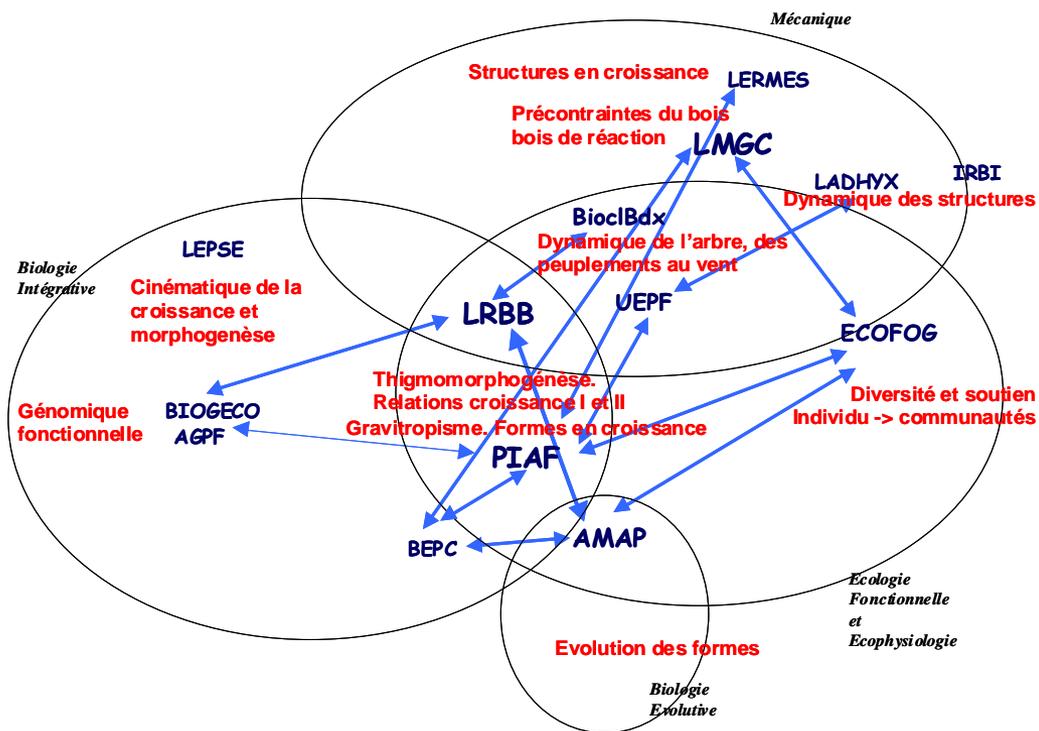
Mécanique

L'appel de la forêt

Enseignement



Des réseaux pour sauter les barrières



Extrait de :

La biomécanique des végétaux : état des recherches dans la communauté nationale et à l'INRA, propositions.

Meriem FOURNIER, Août 2003.

Doc interne Département FMN INRA.



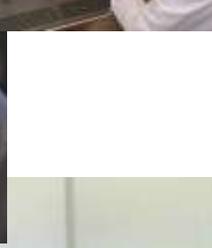
Construire les dynamiques d'équipes

Beaucoup de travail (terrain, serre, labo ...)



Beaucoup d'observations et de manips répétées

Merci à nos équipes techniques



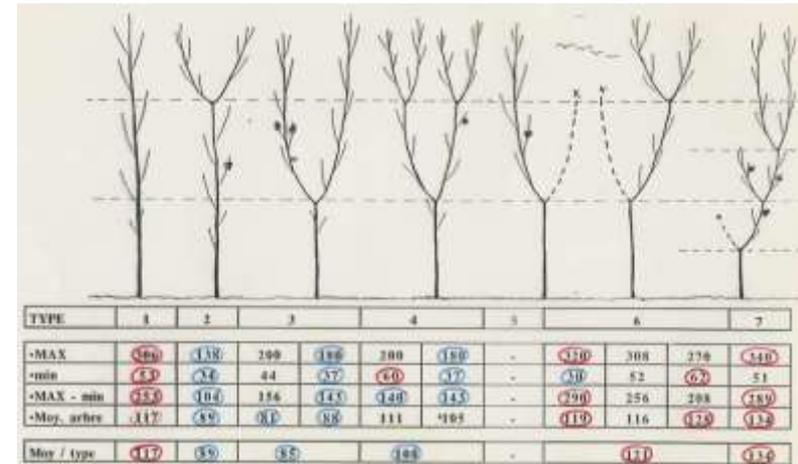
Biomécanique des arbres et du bois :

Quand les questions biologiques viennent de la technologie

- Pourquoi certaines grumes éclatent à l'abattage ?
 - ✓ Faire des modèles mécaniquement propres
 - ✓ Elles éclatent parce que a) la polymérisation des parois génère des déformations, b) cette énergie mécanique est stockée tout au long de la croissance de l'arbre et libérée brutalement à la coupe
 - ✓ Prolongement finalisé : On peut travailler à ce qu'elles éclatent moins (diminuer le diamètre d'exploitation, détecter les situations où il y a beaucoup de bois de tension, procédés)
 - ✓ Plus généralement : comment cette énergie mécanique contribue a) aux croissances et survie de l'arbre et b) à la préhistoire mécanique du bois : « un matériau enregistre des efforts à partir du moment où il existe (et seulement à partir de là) »



Pr. Hiroyuki Yamamoto, Université Nagoya, Japon



Peupliers I214, étude nationale IDF peuplier 1994
Forêt entreprise 1999

Enjeux pour la foresterie et l'utilisation du bois ?

Comment produire des arbres mécaniquement stables ? Des bois bien droits de haute qualité mécanique ?



La préhistoire mécanique du bois se voit dans les bois pelucheux, nerveux ... expliquez moi et voyons comment faire avec



La stabilité mécanique est un problème



EUROPEAN FOREST INSTITUTE
ATLANTIC EUROPEAN REGIONAL OFFICE - EFIATLANTIC

Destructive Storms in European Forests: *Past and Forthcoming Impacts*

Barry Gardiner, Kristina Blennow, Jean-Michel Carnus,
Peter Fleischer, Frederik Ingemarson, Guy Landmann,
Marcus Lindner, Mariella Marzano, Bruce Nicoll,
Christophe Orazio, Jean-Luc Peyron, Marie-Pierre
Reviron, Mart-Jan Schelhaas, Andreas Schuck, Michaela
Spielmann, and Tilo Usbeck

Disclaimer

This report was produced under contract from the European Commission. It solely reflects the views of the authors, and it should not be interpreted as a position of the European Commission. Neither the European Commission, nor any person acting on its behalf can be held responsible for the use of this document or of the information contained within.

Final report to European Commission - DG Environment



<http://www.gip-ecofor.org/?q=node/245>

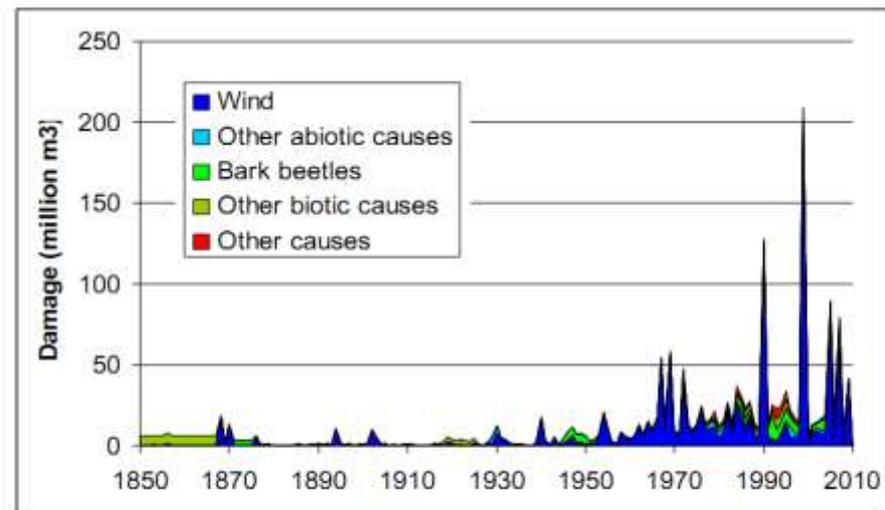


Figure 1a: Total damage due to disturbances in Europe (Schelhaas 2008a). The category "Other causes" includes anthropogenic damage, unidentified causes and mixed causes.

Le poser avec le langage de la mécanique des solides

Est-ce que cet arbre risque de tomber ou fléchir?

Est-ce qu'il est assez résistant ou assez rigide ?

**Est-ce qu'il est assez épais ?
Ou trop élancé ?**

Est-ce qu'il est fait de bois suffisamment résistant ou rigide ?

Combien de vent ou de masse peut-il supporter ?



Plus généralement

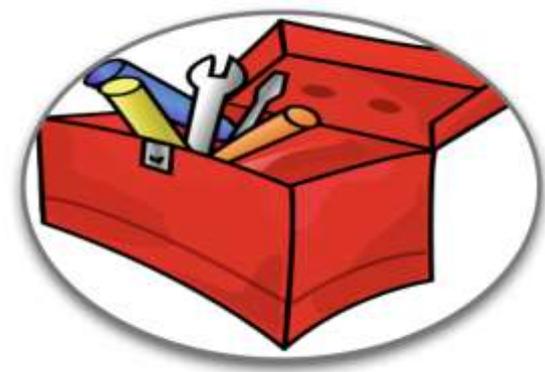
Quelles combinaison de

- **charges**
- **morphologies (géométrie)**
- **propriétés du bois**

Sont risquées (ou sans danger)



La mécanique des solides offre sa boîte à outils



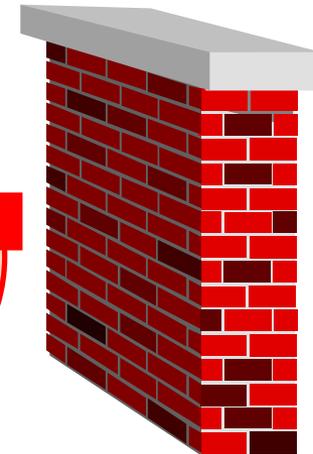
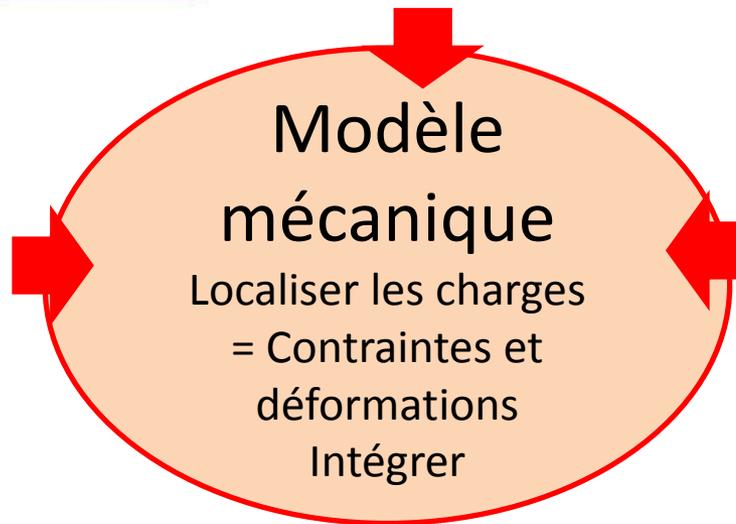
Input

Charge:
« contrainte » écologique

Propriétés du bois
(Domaines de
sécurité, rigidité)



Input



Input

Géométrie
de l'arbre

Output

Domaine de sécurité
de l'arbre

Limites de rupture
Limites de flambement

Cette boîte à outils est utilisable dans des systèmes d'aide à la décision en aménagement forestier



- Il faut injecter les données
- C'est de la pure physique « abiotique » (néanmoins compliquée)


Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du
**DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE
TOULOUSE**

Délivré par : l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Présentée et soutenue le 19/05/2014 par :
David PIVATO

**Les interactions vent - forêt en condition de tempête :
un modèle couplé prenant en compte la rupture des arbres**

JEAN-LUC ATTÉ	Professeur	Examinateur
MÉRIEM FOURNIER	Directeur de Recherche	Rapporteur
EMMANUEL DE LANGRE	Professeur	Examinateur
PATRICK MASCART	Physicien	Invité
CÉLINE MÉREDIEU	Chargée de Recherche	Examinateur
BRUNO MOULIA	Directeur de Recherche	Examinateur
IVANA VINKOVIC	Maître de Conférence	Rapporteur

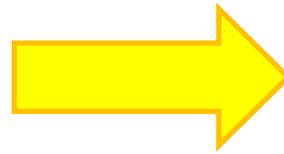
École doctorale et spécialité :
SDU2E : Océan, Atmosphère et Surfaces Continentales

Unité de Recherche :
UMR ISPA, INRA Bordeaux

Directeur(s) de Thèse :
Yves BRUNET et Sylvain DUPONT

Mais au-delà de la pure physique

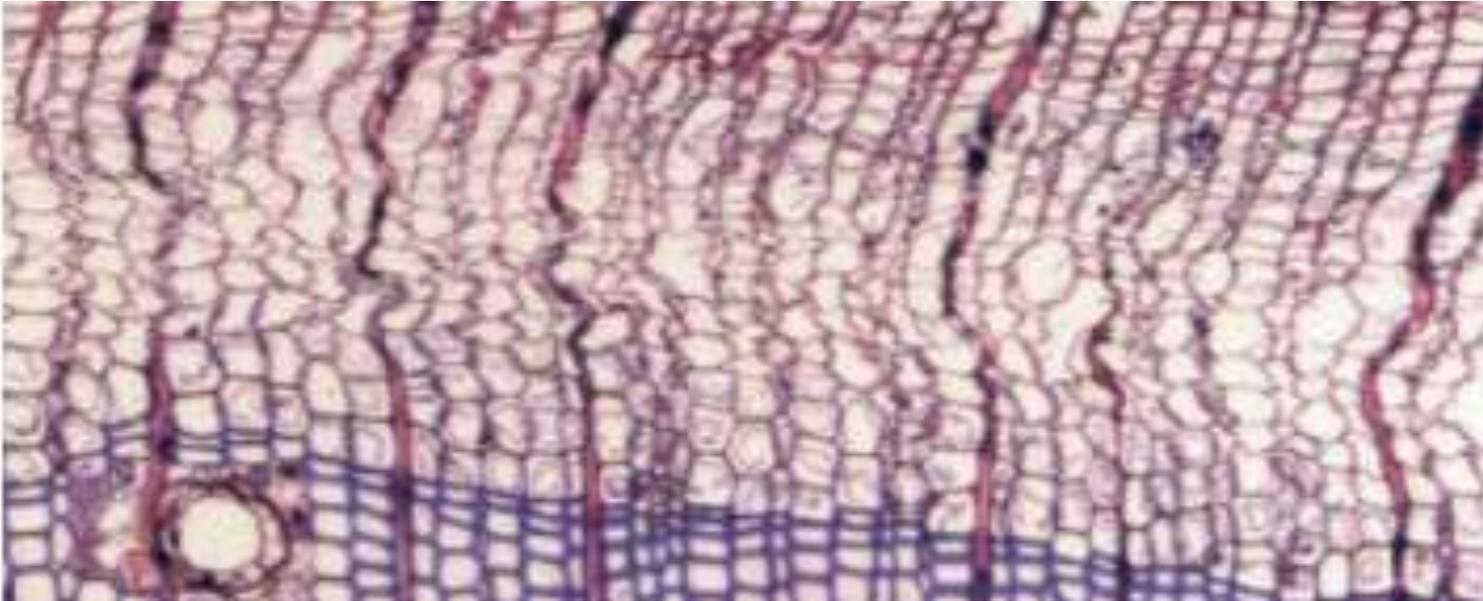
**Ce qui fait des arbres des objets
mécaniques différents des
constructions en bois, c'est la
croissance !**



**Le croissance est un challenge
mécanique !**



Coordination de la croissance cellulaire dans un tissu: C'est un pb mécanique que d'assurer la compatibilité des déformations entre cellules voisines



Cambial zone

Une part de déformations de croissance ou de maturation est gênée avec des transferts de charges d'une cellule à l'autre = « auto-contraintes »

Cf : Les fameuses « contraintes de croissance » (qui sont plus précisément des « contraintes de maturation ») qui conduisent aux bois qui se fendent sans raison quand on tronçonne ou scie



N'importe quelle étape de croissance dans n'importe quel tissu génère des autocontraintes !

**L'évolution a fait qu'elles ne sont pas des risques de rupture
Sont-elles des signaux de régulation de la croissance ?**

- ⇒ Signaux biochimiques: hormones
- ⇒ Signaux électro-chimiques
- ⇒ **Signaux mécaniques**

RESEARCH ARTICLES

12 DECEMBER 2008 VOL 322 SCIENCE www.sciencemag.org

**Developmental Patterning by
Mechanical Signals in *Arabidopsis***

Olivier Hamant,^{1,2*} Marcus G. Heisler,^{3*} Henrik Jönsson,^{4*} Pawel Krupinski,⁴ Magalie Uyttewaal,^{1,2}
Plamen Bokov,^{5,6} Francis Corson,⁵ Patrik Sahlin,⁴ Arezki Boudaoud,⁵
Elliot M. Meyerowitz,^{3†} Yves Couder,^{6†} Jan Traas^{1,2†}



**Sujet chaud en biologie végétale
Peut être une clé du pourquoi
des patrons anatomiques et
micro-densitométriques**

Retour sur la croissance de l'arbre

Le challenge du port érigé contre la gravité « Bouge toi pour tenir droit ! »

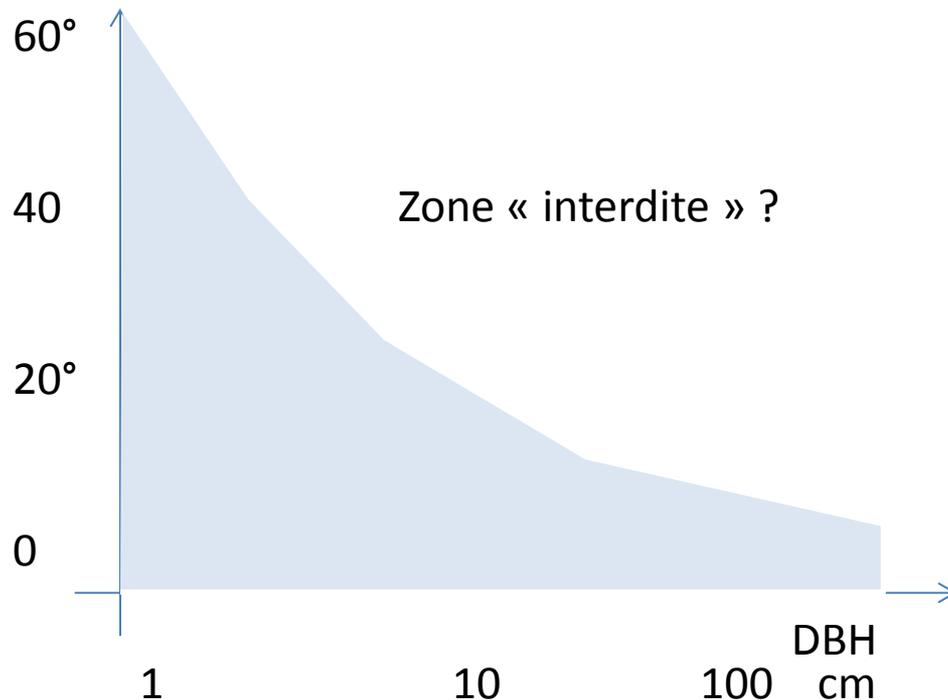


Un poids de plusieurs tonnes pour amener des capteurs solaires à 40m de haut, tout ça sur un poteau en bois de 60cm de diamètre. Ça devrait jamais tenir vertical et droit comme ça pendant 100 ans !!



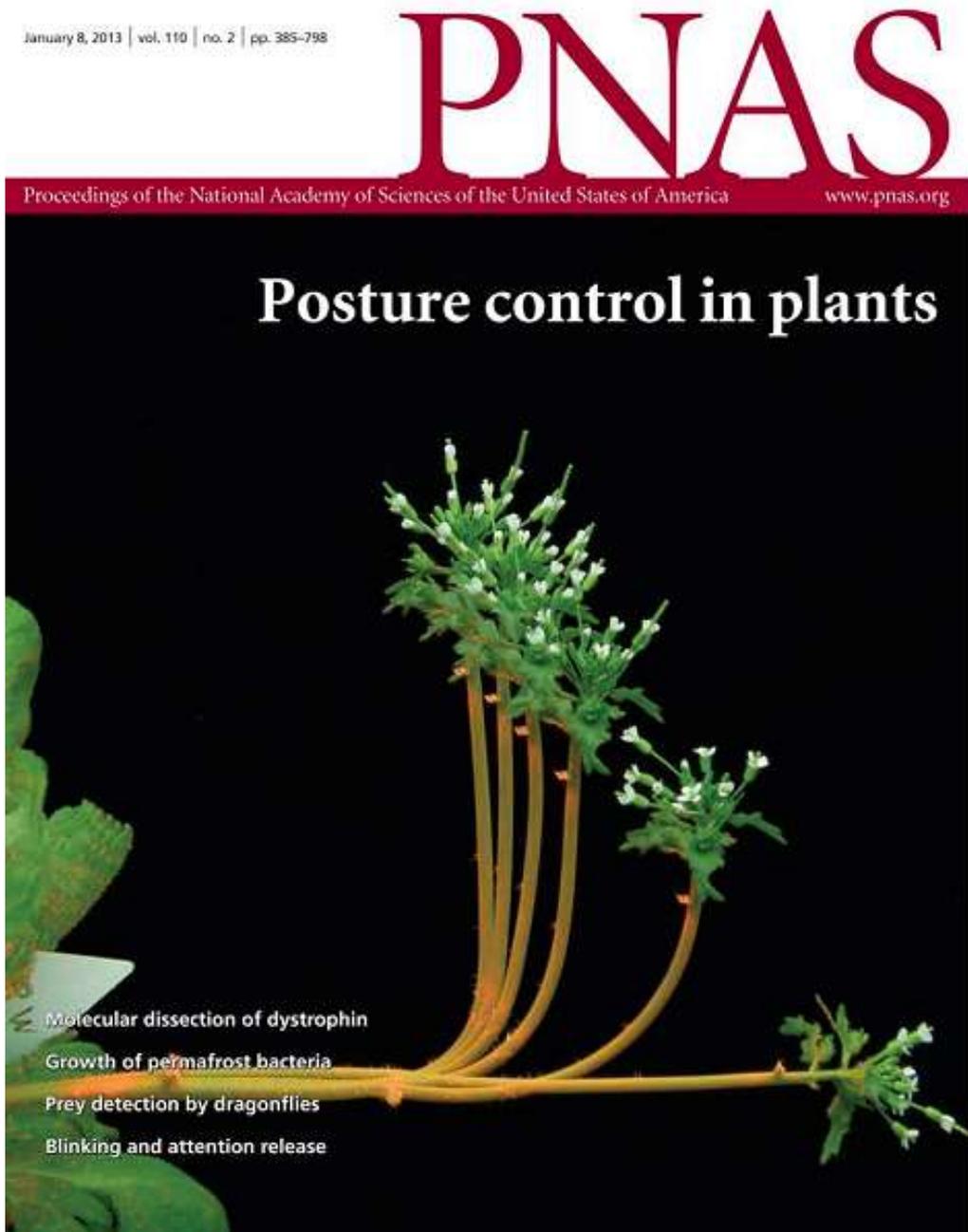
Une observation dendrométrique : on ne trouve d'arbres très penchés autour de la base que dans les petits diamètres

Inclinaison locale
autour de 1,3m



Quelle explication ?

On peut en trouver
plusieurs
mais il y a un mécanisme
bien connu c'est
« gravitropisme »

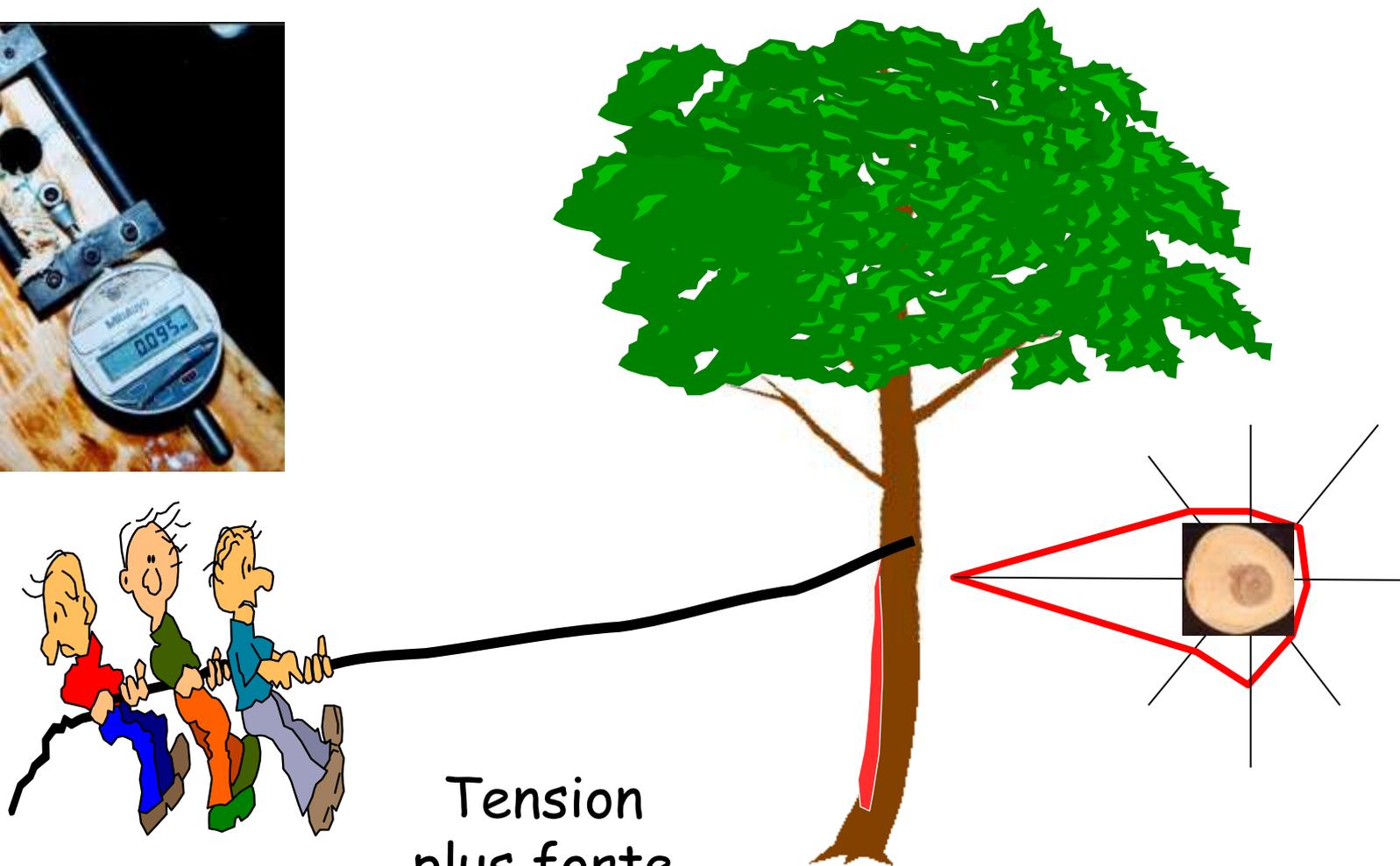


**Sauf qu'un axe ligneux,
c'est rigide**

**Comment produire
l'énergie nécessaire
pour redresser/courber
en « tartinant » du
matériau sur la
périphérie ?**



On observe que la tension périphérique générée par le maturation cellulaire est rarement symétrique, de sorte qu'une face de l'arbre « tire » sur l'autre



Tension
plus forte
de ce côté

Ces fortes tensions qui nous causent tant de problèmes technologiques ont donc un intérêt pour l'arbre !



Photo D. Jullien LMGC.



Photo 1. Lamelles de peuplier montrant un état de surface pelucheux suite à la présence de fibres gélatineuses en proportion importante dans le bois — *Poplar planks showing woolly surface due to the presence of an important proportion of gelatinous fibers in the wood.*

Jourez, 1997.

Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 1997 1 (2), 100–112

- On peut même démontrer que « sans gravitropisme, pas de régénération, pas de forêts »
- **Ce sujet de physiologie** (y compris en expérimentant en micro-gravité dans la navette spatiale) **mérite donc plus de considération de la part de l'écologie**
- **Pratiquement il existe des systèmes sylvicoles où on peut bénéficier du gravitropisme juvénile sans trop impacter la qualité technologique**

Annals of Botany 107, 1345–1353. 2011

Growth and posture control strategies in *Fagus sylvatica* and *Acer pseudoplatanus* saplings in response to canopy disturbance

Catherine Collet*, Mériem Fournier, François Ningre, Ablo Paul-Igor Hounzandji and Thiéry Constant

ANNALS OF
BOTANY

Journal of Experimental Botany 60, 4397–4410. 2009

Functional diversity in gravitropic reaction among tropical seedlings in relation to ecological and developmental traits

Tancrede Almeras^{1,*}, Morgane Derycke¹, Gaëlle Jaouen¹, Jacques

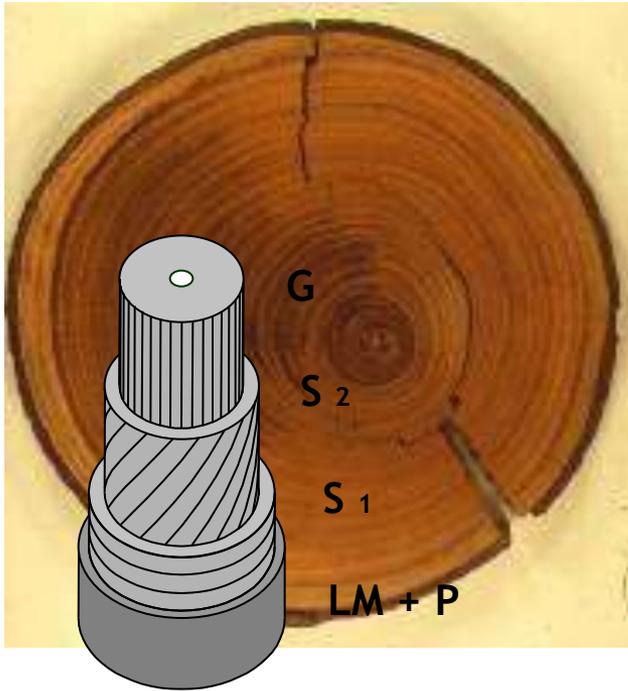
Biomechanical differences in the stem straightening process among *Pinus pinaster* provenances. A new approach for early selection of stem straightness

Tree Physiology 28, 835–846

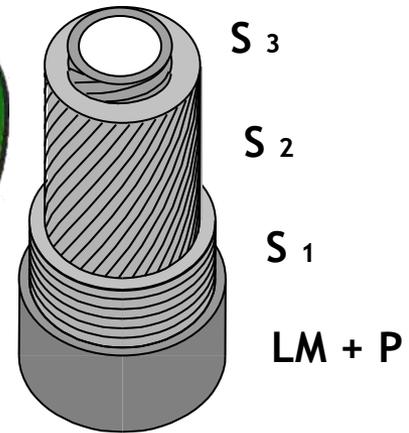
© 2008 Heron Publishing—Victoria, Canada

ROSARIO SIERRA-DE-GRADO,^{1,2} VALENTÍN PANDO,³ PABLO MARTÍNEZ-ZURIMENDI,¹ ALEJANDRO PEÑALVO,¹ ESTHER BÂSCONES¹ and BRUNO MOULIA⁴

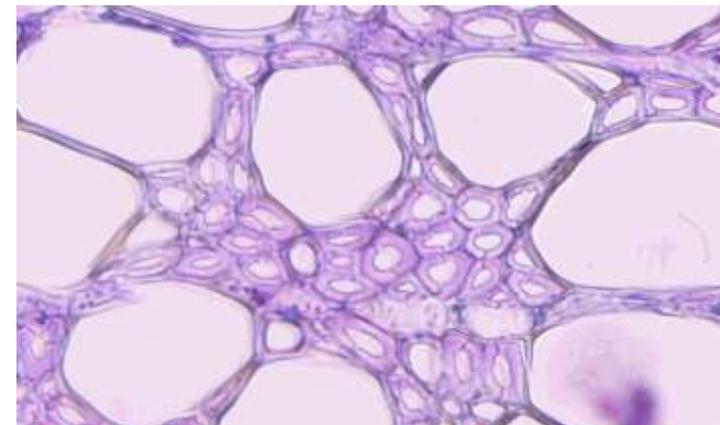
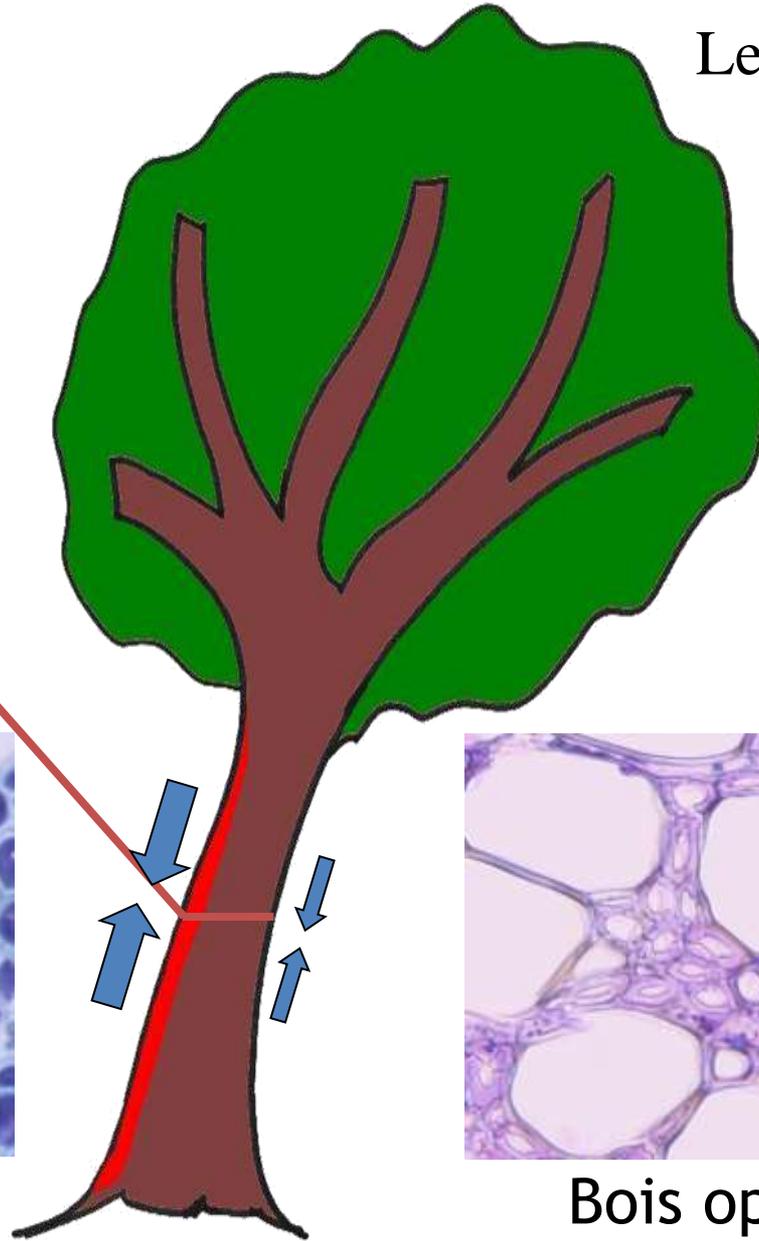
L'évolution a sélectionné deux voies opposées pour générer des autocontraintes de tensions "anormales"



Les angiospermes

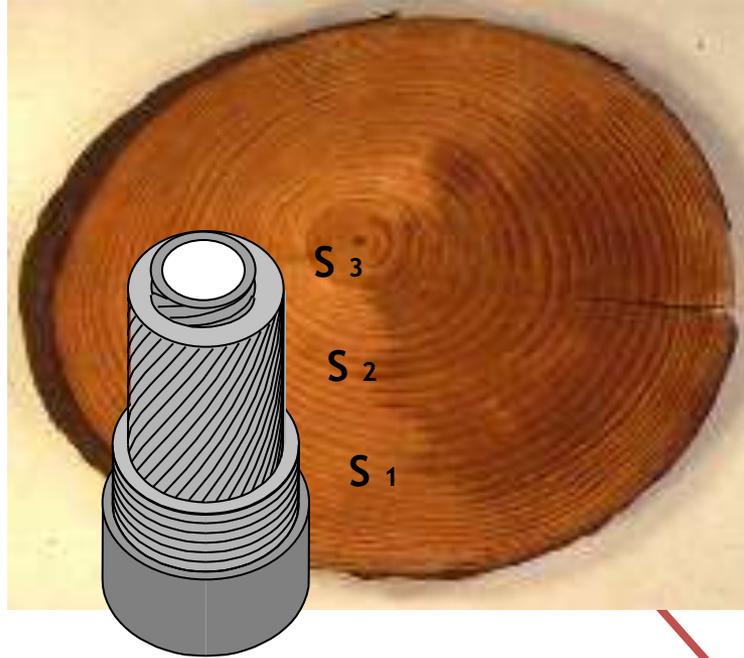


Bois de tension

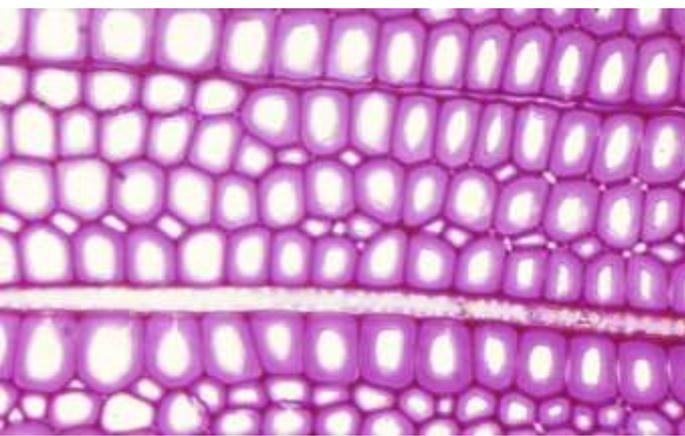
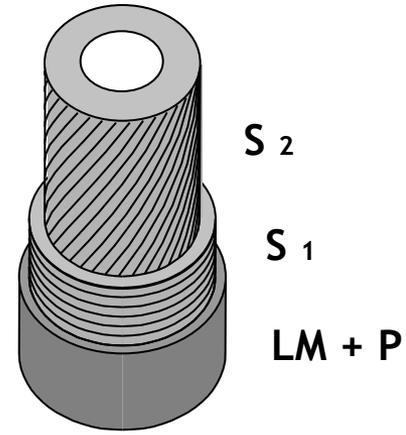


Bois opposé/ normal

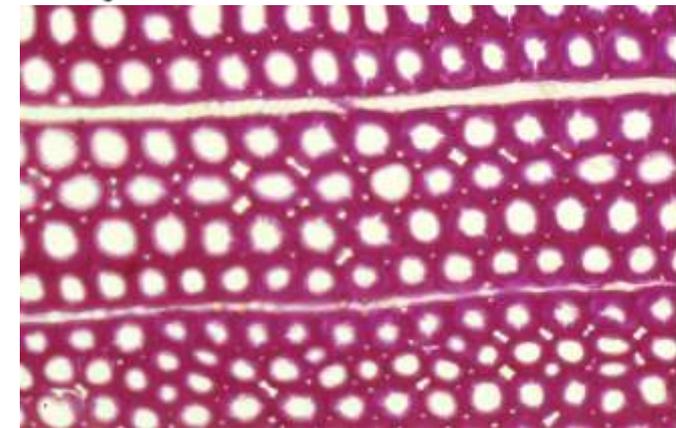
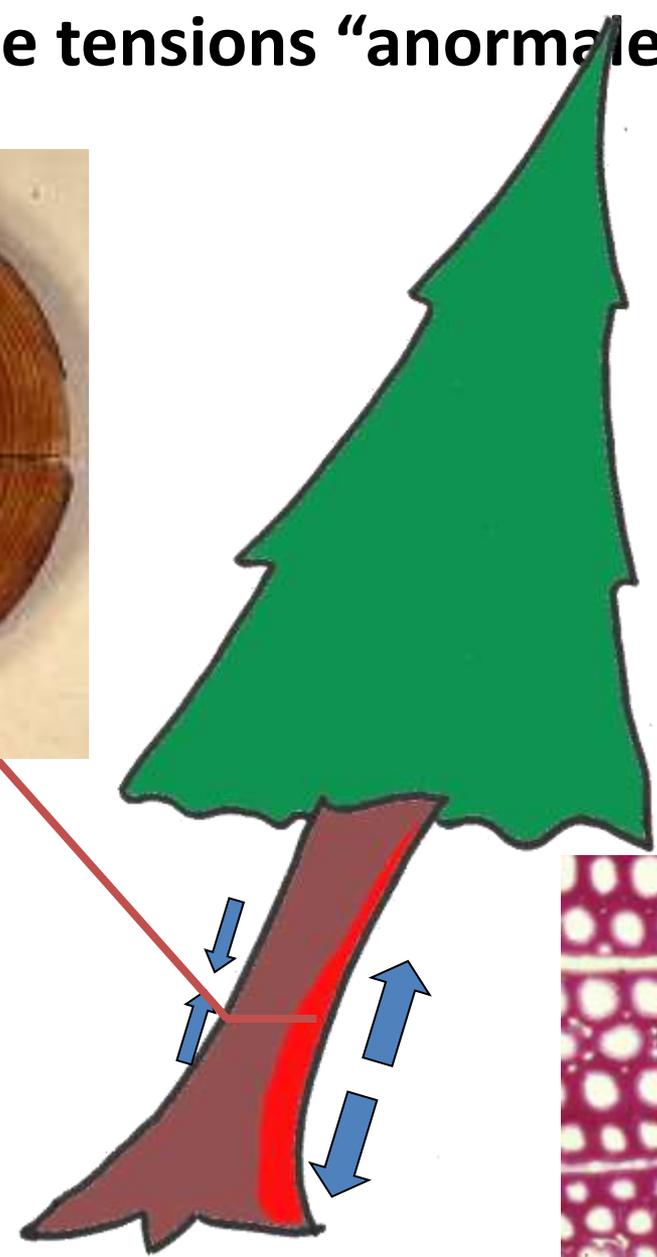
L'évolution a sélectionné deux voies opposées pour générer des autocontraintes de tensions "anormales"



Les gymnospermes
(+ Buxus)



Bois opposé/normal

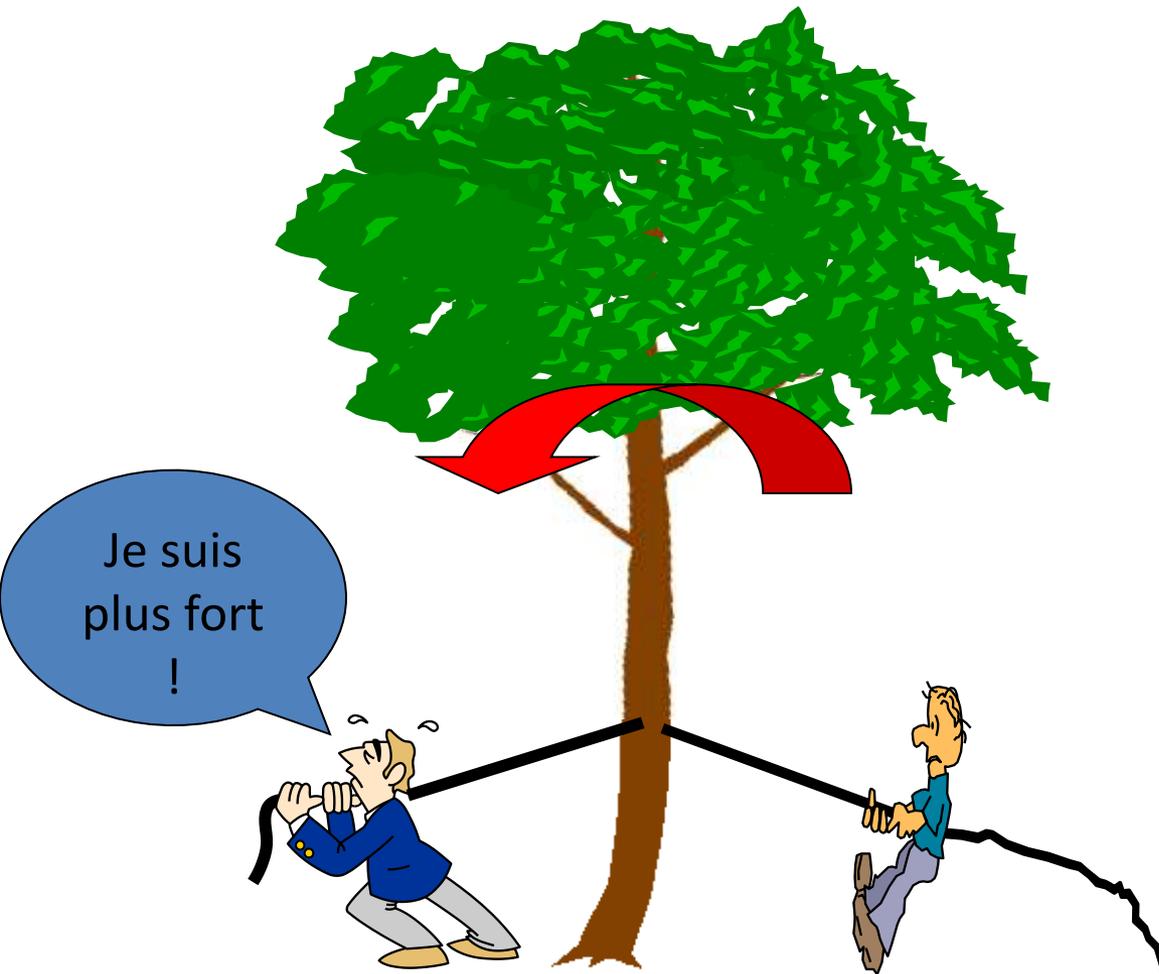
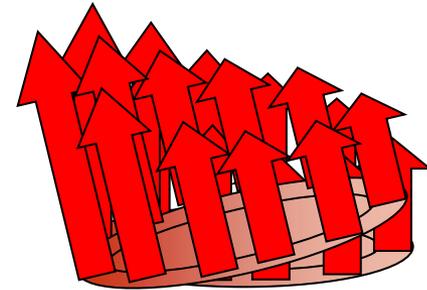


Bois de compression

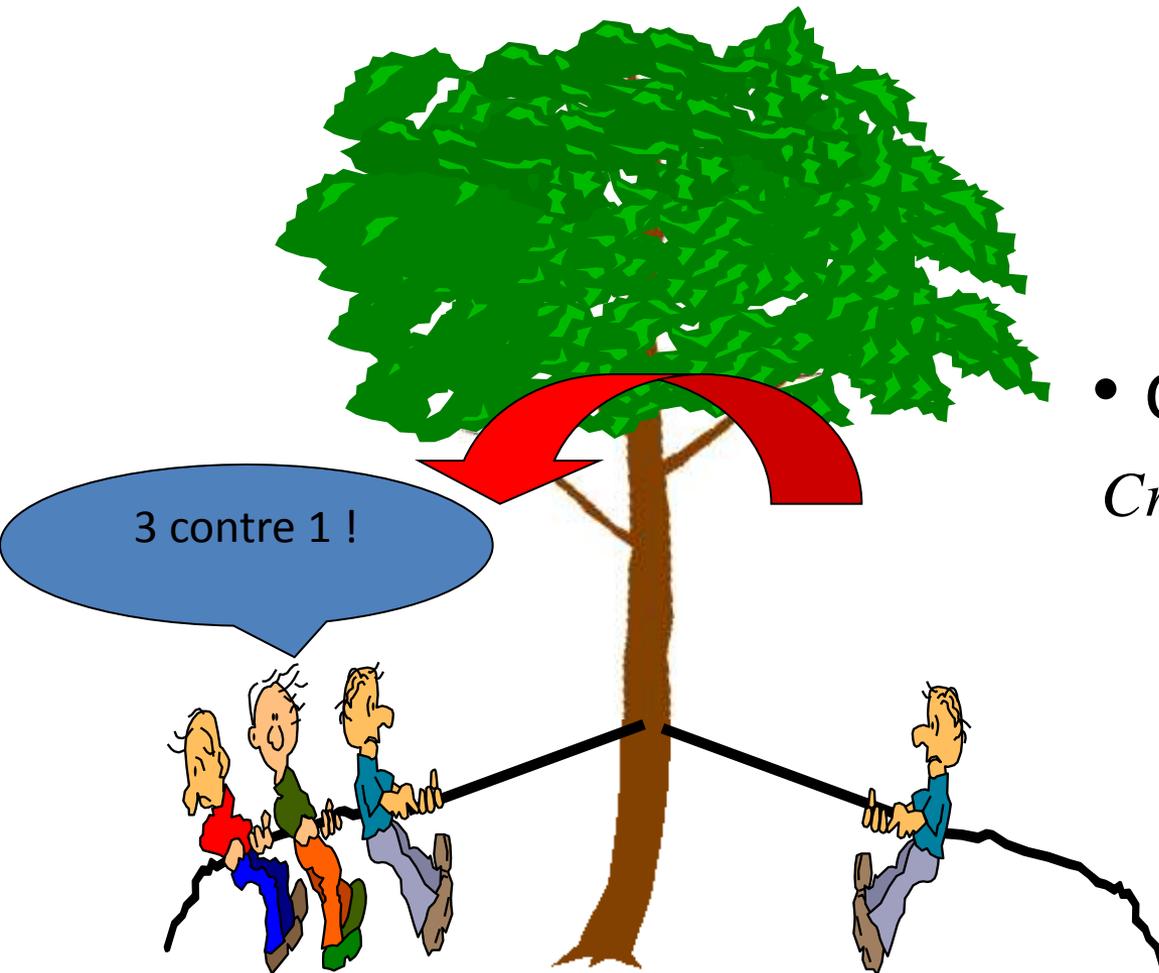
Mouvement
↑
asymétrie
des forces de maturation

Asymétrie de :

- **la qualité du bois**

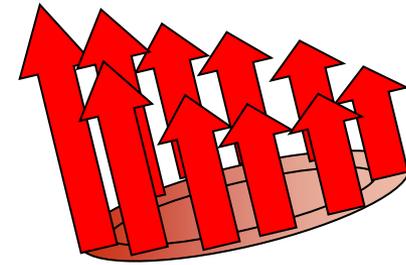


Mouvement
↑
asymétrie
des forces de maturation



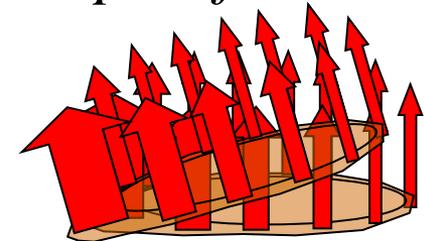
Asymétrie de :

- la qualité du bois



- de la croissance

Croissance plus forte





Autre aspect du challenge mécanique de la croissance

Growing in the wind ?



Science & Vie 1077 : 82-86 (juin 2007)

La forme des arbres répond aux vents

C'est même utilisable pratiquement pour évaluer la ventosité d'un site (Indice de Griggs Putnam)

WIND POWER SYSTEMS

AEROSPACE INFLUENCED DESIGN & ENGINEERING

GOVERNMENTAL. MILITARY, COMMERCIAL, RESIDENTIAL, MARINE,
AND EMERGENCY FIXED BASE & MOBILE HIGH EFFICIENCY
SMALL & MICRO WIND POWER

<http://vimeo.com/37066423>

WIND POWER SYSTEMS
"SMALL WIND"/BIG POWER



Griggs - Putnam Wind Energy Index

Home

About Us

Renewable Wind Power

Game Changing Design

Aerospace Engineering

Prototype In Development

Connection Schematic

Virtual Image Gallery I

Virtual Image Gallery II

Incentives

USA Wind Map

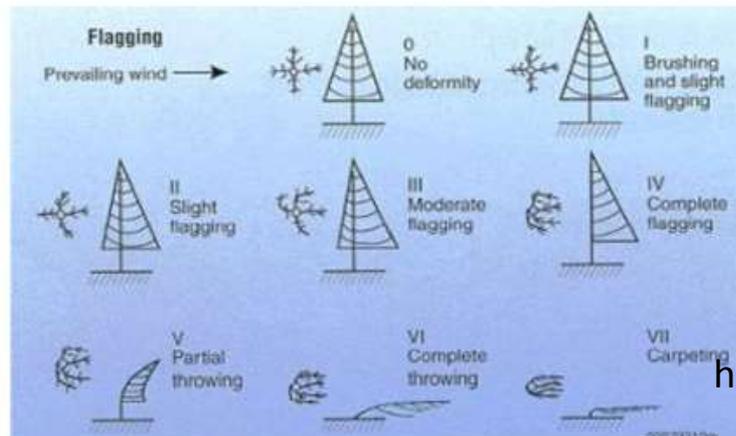
Beaufort Wind Scale

Griggs - Putnam Energy Index

Wind Power in the News

Contact Us

The Griggs-Putnam Index is one of several empirical methods of estimating the prevailing wind speed at a site by observing the growth patterns of trees. Strong winds will deform trees and shrubs so that they indicate an integrated record of the local wind speeds during their lives. The effect shows up best on coniferous evergreens because their appearance to the wind remains relatively constant during the year. Deciduous trees shed their leaves in the winter and thus change the exposed area tremendously. If average wind speed is high but still below some critical value, above which deciduous trees cannot survive, they will not indicate relative differences in wind speeds very well, although they do show distinctive wind damage.



<http://www.windpowersystemsllc.com>



0. Pas d'effet

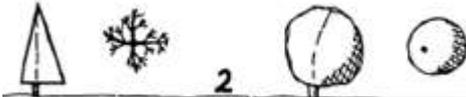
1. Brossage

Les branches d'ordre ultime ou les feuilles indiquent la direction des vents dominants. La couronne est légèrement asymétrique



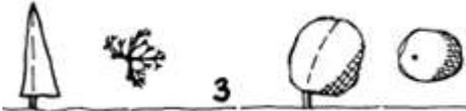
2. Drapeau léger

*Les petites branches s'incurvent
La couronne est sensiblement asymétrique*



3. Drapeau modéré

Les plus grosses branches se courbent dans la direction du vent



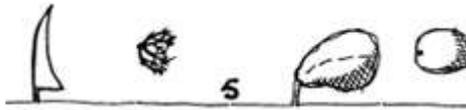
4. Fort drapeau

Toutes les branches vont dans la direction du vent. Port typique en drapeau



5. Renversement partiel

Le tronc s'incline mais reste vertical près du collet



6. Renversement fort

Le tronc est bien incliné partout



7. Végétation de vents forts (« carpeting »)

Port prostré et arbustif



Griggs-Putnam Index of Deformity							
Index	I	II	III	IV	V	VI	VII
Wind mph	7-9	9-11	11-13	13-16	15-18	16-21	22+
Speed m/s	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	10



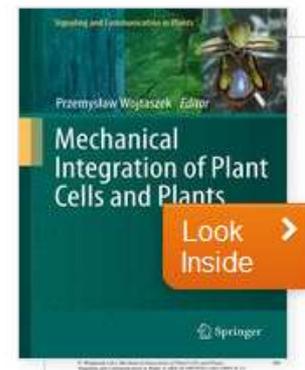
Très généralement

Comment les arbres ont appris à sentir leur environnement mécanique, à s'en servir pour pousser et tenir droit, ce qui les a autorisé à adopter un dimensionnement risqué et audacieux ...

Mechanical Integration of Plant Cells and Plants
Signaling and Communication in Plants Volume 9, 2011, pp 269-302

Integrative Mechanobiology of Growth and Architectural Development in Changing Mechanical Environments

B. Mouliá, C. Der Loughian, R. Bastien, O. Martin, M. Rodríguez, D. Gourcilleau, A. Barbacci, E. Badel, G. Franchel, C. Lenne, ... [show all 17](#)



Croissance = augmentation de la hauteur (bras de levier) et de la couronne (surface de prise au vent, masse portée)

❶ Les forces supportées augmentent (fortement)

Mais la croissance en diamètre, les propriétés du bois changent aussi pendant la croissance

❷ La “stabilité” mécanique (risque de casse, déformabilité) change donc de façon a priori inconnue (elle n’augmente pas forcément mais elle change)

❸ Et en plus le climat venteux lui même est susceptible de changer pendant la croissance (entre le sous bois protégé et la canopée exposée, le peuplement dense qui s’ouvre après éclaircie ...)

↳ Un dimensionnement mécanique génétiquement préfixé serait complètement inadapté

⇒ Les plantes ne peuvent survivre qu'en ayant les moyens
d'***acclimater leur dimensionnement mécanique***
(géométrie and propriétés du tissu) ***durant leur***
développement

Les plantes « **se mesurent au vent¹** » en permanence
pour **réguler leur croissance et leur dimensionnement**
à partir de la **perception de signaux mécaniques par les**
cellules vivantes (mécabiologie)

¹ ou plus précisément à ce que les cellules perçoivent de leur « micro-climat mécanique », c'est-à-dire le vent filtré par toute une chaîne de transfert de la pression du vent. Pour gérer ce filtrage, on a besoin de la « boîte à outils » mécanique

Pas de vent, peu de bois et peu de racines : les arbres investissent beaucoup plus dans la croissance souterraine et aérienne en masse lorsqu'ils perçoivent les sollicitations mécaniques

Premières expériences Knight, 1803:

“If a tree be placed in a **high and exposed situation**, where it is much kept in motion by winds, the new matter which it generates will be deposited **chiefly in the roots and lower parts of the trunk ...**

Knight T. A.. 1803. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 96. <http://www.jstor.org/stable/107076>



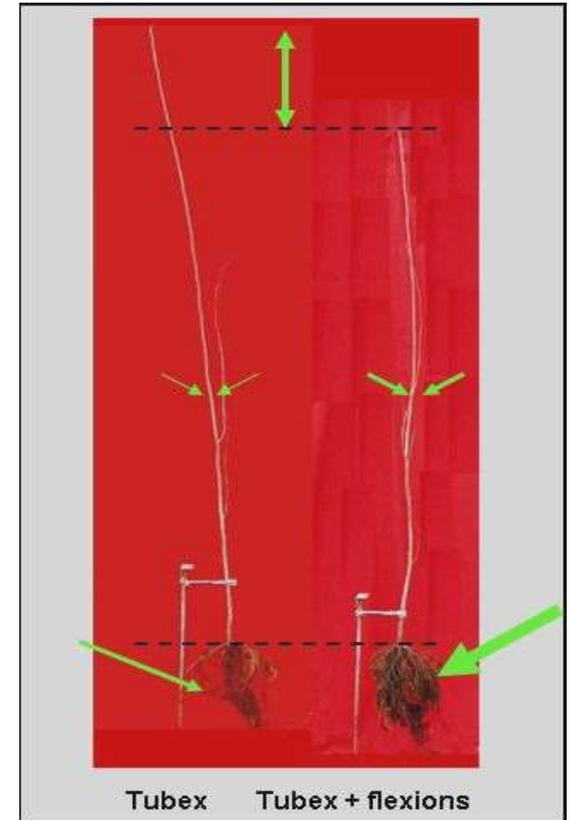
***Tachigali melinonii* une espèce héliophile qui devient systématiquement non autoportante en couvert dense**

Jaouen et al 2010

Les protections (Tubex) modifient la croissance en limitant la perception mécanique

Coutand et al. 2008.

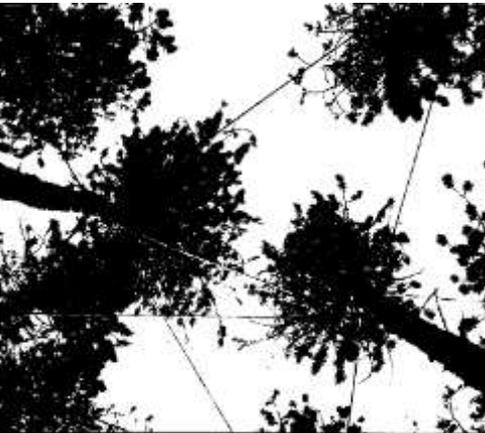
Annals of Botany 101 (9): 1421-1432



Expérimentations sur de gros arbres

Pinus contorta (50-55 ans) attachés à 10m pour réduire les balancements et les moments de flexion en dessous de 10m
 Belle expérience (répétitions, plusieurs sites et placettes, Alberta)
 Résultats spectaculaires après six ans

Mark Rudnicki
 Assistant professor
 U. Of Connecticut



Journal of Experimental Botany, Vol. 57, No. 12, pp. 3175–3182, 2006
 doi:10.1093/jxb/erl079 Advance Access publication 14 August, 2006
 This paper is available online free of all access charges (see http://jxb.oxfordjournals.org/open_access.html for further details)



RESEARCH PAPER

Reducing stem bending increases the height growth of tall pines

Shawn X. Meng^{1,*}, Victor J. Lieffers¹, Douglas E. B. Reid^{1,†}, Mark Rudnicki², Uldis Silins¹ and Ming Jin³

¹ Department of Renewable Resources, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada T6G 2H1

² Department of Natural Resources Management and Engineering, University of Connecticut, 1376 Storrs Road, Storrs, CT 06269, USA

³ Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada T6G 2W2

Ratio of growth after (1999-2003) / before (1993-1997) tethering	Tethered trees	Control trees
Height	40%	-20%
Basal area at 1.3m	-23%	-7%

Connection avec le problème de la stabilité ?

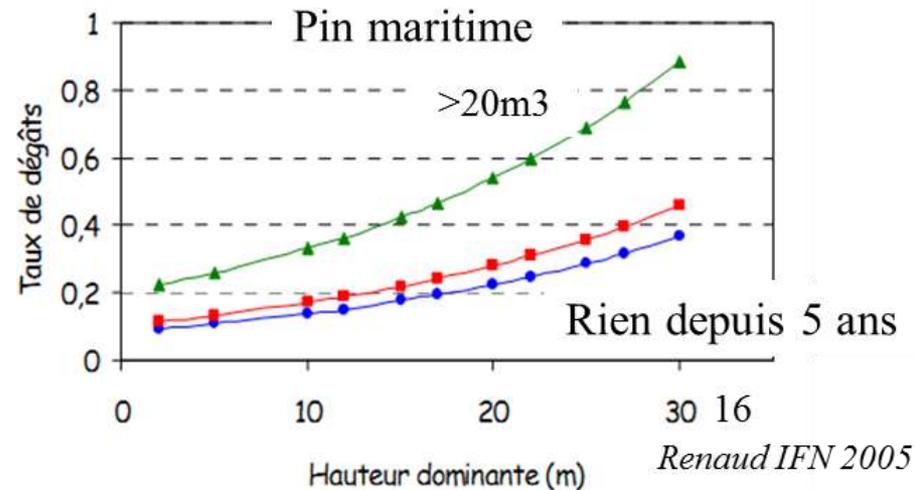
Les arbres adaptent leur croissance aux vents habituels.

Les forêts s'endurcissent d'elles mêmes pour résister aux vents forts habituels. Quand ne sont-elles pas suffisamment endurcies ?

- Tempêtes exceptionnelles ?
 - Perturbations qui font que les arbres non endurcis se retrouvent brutalement exposés ?
 - Prendre l'endurcissement en compte dans l'évaluation de la sensibilité des peuplements ?
- Dans les pratiques d'aménagement ?

Des indicateurs pourtant physiquement fondés comme le H/D sont peu robustes.

Eclaircies : les éclaircies intenses fragilisent les peuplements essentiellement pendant deux ans

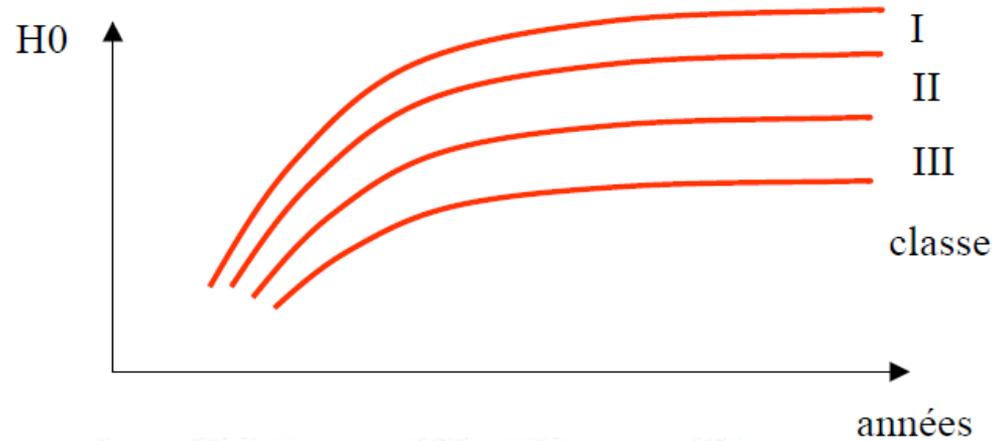


Le changement climatique demande d'explicitier comment la croissance dépend des facteurs climatiques

Des modèles de croissance « vent » dépendants ?

$$H_0 = f(\text{âge}, \text{fertilité})$$

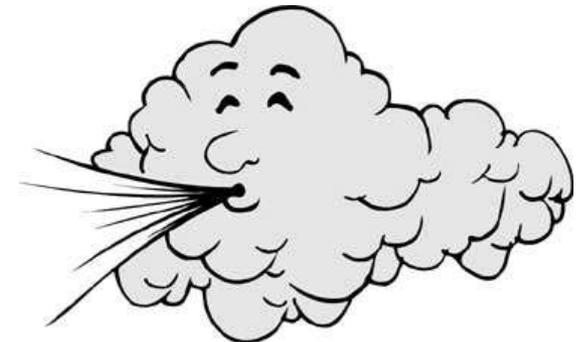
$$G = f(H_0, \text{sylviculture})$$



Development of models to predict *Pinus radiata* productivity throughout New Zealand

Michael S. Watt, David J. Palmer, Mark O. Kimberley, Barbara K. Höck, Tim W. Payn, and David J. Lowe

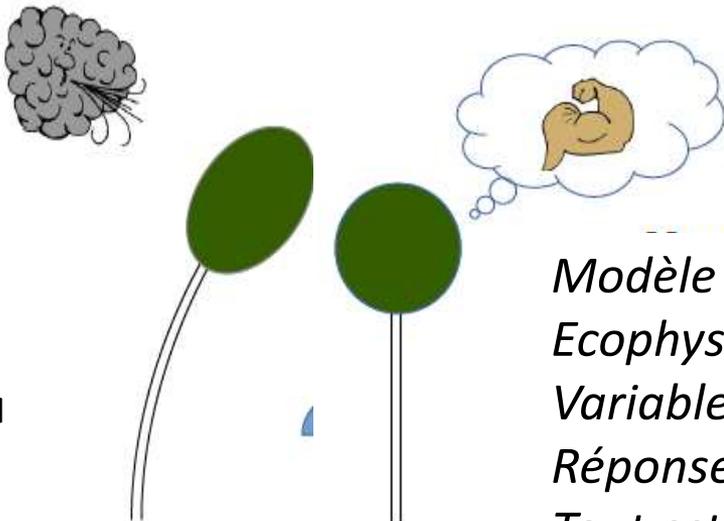
Can. J. For. Res. 40: 488–499 (2010)



La thèse en cours de Vivien Bonnesoeur (Projet ANR FOR-WIND)



**Modèle forestier ?
Long terme
Arbre en permanence
sollicité et donc plus ou
moins désensibilisé**



*Modèle S3m
Ecophysiologique
Variable perçue
Réponse instantanée
Tout est contrôlé
Désensibilisation
B. Moulia PIAF*

**Expérimentation ONF Forêt de Haye : Perchis de hêtre
Mesure des déformations perçues et rôle du vent dans la
réponse à l'éclaircie**



F. Ningre
LERFoB
Expérimentation
sylvicole



T. Constant
LERFoB
Expérimentation
biomécanique



F. Bravo
Uva Espagne
Modèles
Pin Alep



M. Fortin
LERFoB
Modèles
Croissance



B. Gardiner
ISPA INRA
Risque tempête
Croissance QB

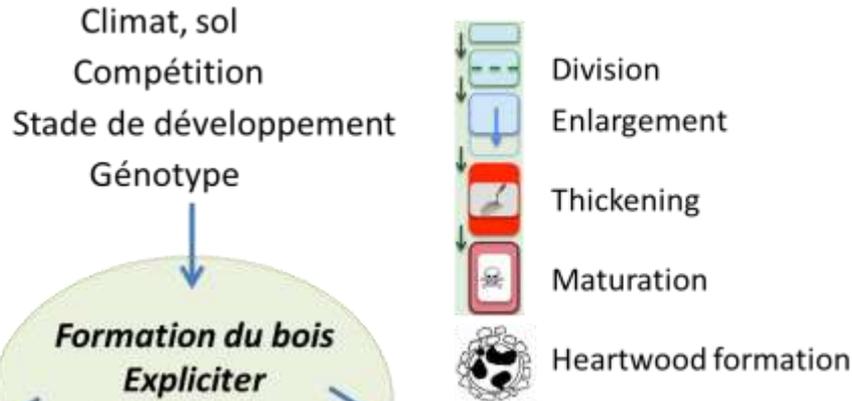


C. Meredieu
BIOGECO INRA
Modèles
Croissance

Une tâche de fond

Revisiter les modèles croissance qualité des bois

Propriété du bois = f(largeur de cerne, position radiale) x génotype



Anatomie, structure
Types cellulaires
Patrons de taille de cellules
Angle des microfibrilles
Composition chimique

Volumes
Propriétés « de base »

Propriétés technologiques
Mécaniques, physiques
Durabilité ...



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Current Opinion in
Plant Biology

**Wood cell walls: biosynthesis, developmental dynamics
and their implications for wood properties**

Ewa J Mellerowicz and Björn Sundberg

Pour finir à 180 degrés : une préoccupation qui vient se superposer

La re-conception de la formation d'ingénieurs forestiers

Dans un contexte environnemental, social et économique tendu les forêts doivent plus que jamais contribuer à la création de richesses, de bien être et de rêves. Il faut arbitrer des choix sociétaux et maintenir le niveau des compétences pour pouvoir ensuite assurer la mise en œuvre concrète. La formation doit pouvoir relever les défis jetés.

- **Suppression du diplôme d'ingénieur forestier depuis la création d'AgroParisTech, tout en déployant une forte énergie pour créer des parcours forestiers innovants (dont une 3^{ième} Année Milieux Naturels, un master international en anglais, un double diplôme + master « Forêt Bois » avec l'ENSTIB , des formations par apprentissage...)**
- **Une chaire d'entreprise AgroParisTech ONF « Forêts pour demain »**
- **Différents rapports (Caullet, CGAER ...)**
- **Création du CSF Bois (2014)**
- **Rétablissement du recrutement d'IAE forestiers fonctionnaires (2015?)**
- **Création de l'IAVFF (2014)**