



**MECA TEAM**

*Interdisciplinary team for plant  
biomechanics*

# Mécanismes de contrôle de la croissance par la perception des déformations mécaniques au vent

**Nathalie Leblanc-Fournier**

22 Mai 2024

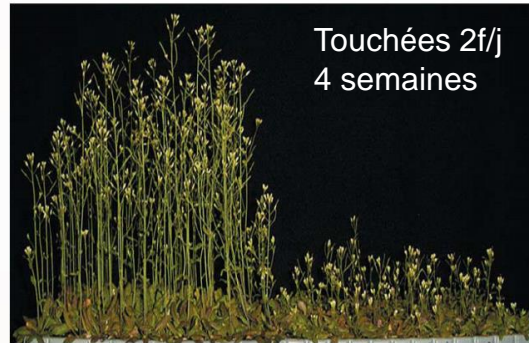
# La thigmomorphogénèse: un syndrome de croissance générique aux espèces ligneuses et herbacées

En conditions naturelles

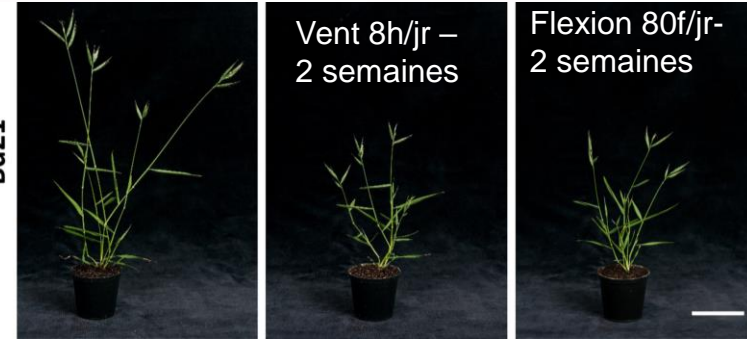


**Luzerne** *Moulià et Combes 2003*

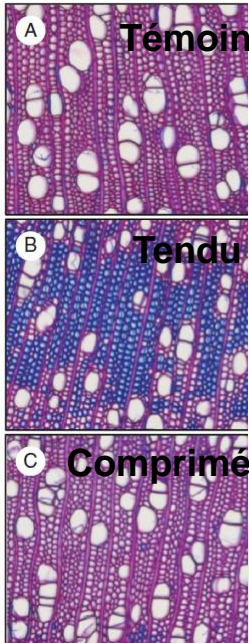
En conditions contrôlées



**Arabidopsis** *J. Braam (2005)*

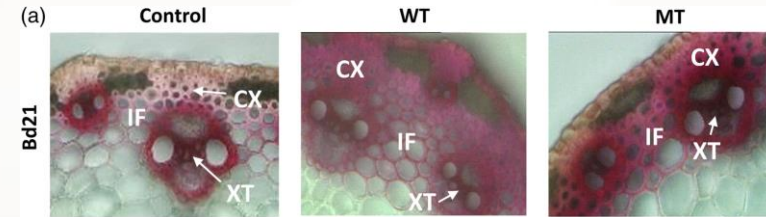


**Brachypodium** *Gladala-Kostarz et al., 2020*



**Témoin Fléchi**  
**Merisier**

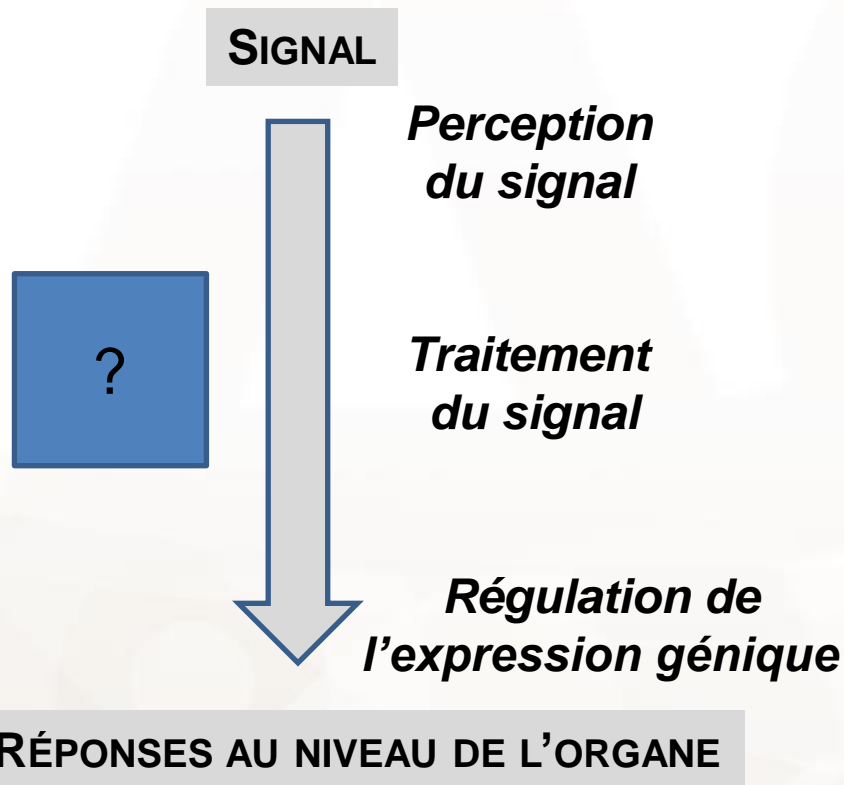
**Peuplier**  
*Roignant et al., 2018*



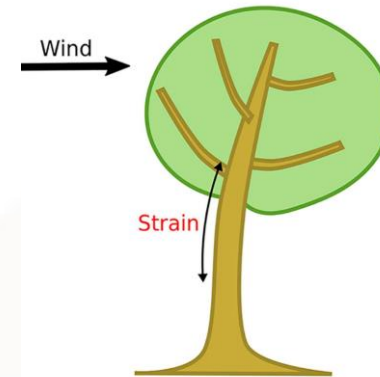
- **Croissance aérienne longitudinale**
- + Croissance aérienne radiale
- Floraison
- + **Développement racinaire**
- + **Modification des propriétés mécaniques**  
(différenciation du bois, modifications pariétales, module de Young)

**Quels sont les mécanismes moléculaires et cellulaires impliqués ?**

# I. Du signal perçu à l'effet sur l'organe cible : *Comment identifier les mécanismes cellulaires et moléculaires sous-jacents ?*



## La quantification du signal: un problème à résoudre



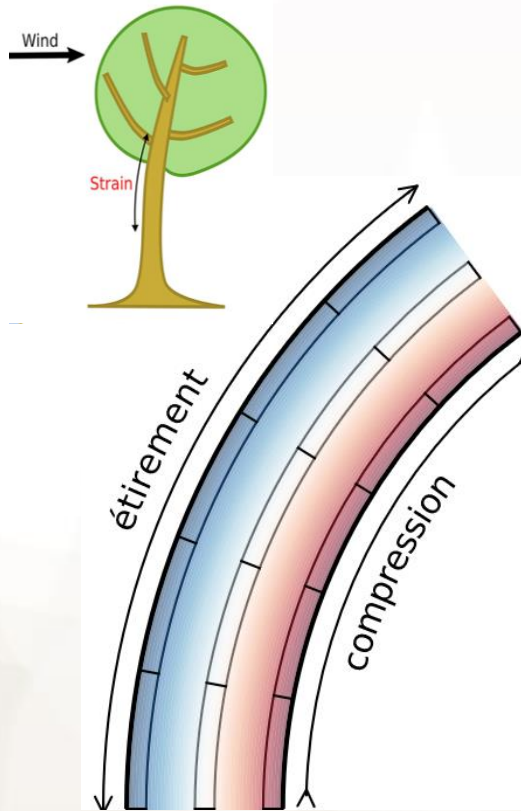
Les sollicitations s'appliquent sur la structure globale de l'arbre



- La déformation engendrée dépend de la taille, la rigidité de tissus...
- Ce sont les cellules vivantes qui perçoivent ces sollicitations

Apport de la modélisation et de la biomécanique

# Comment relier quantitativement la fonction de perception à la réponse de croissance ?



Déformation ( $\epsilon$ ):  
changement local de  
forme et de taille  
(adimensionnel)

## Hypothèse

**Cellule vivante:** plus petite unité impliquée dans la mécanoperception

Changement d'échelle

$$dS_i = k \cdot |\epsilon| \cdot dV$$

Sensibilité



$$dS_i = k_s (\epsilon - \epsilon_0) dV \quad \text{if } \epsilon > \epsilon_0, \text{ else } dS_i = 0,$$

-à condition d'être dans la **zone élastique** (petites déformations)

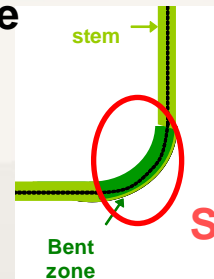
## S3m Organe / zone sollicitée:

À condition que les cellules répondent de manière autonome

↳  $k =$  même sensibilité

$$S = k \cdot \iiint |\epsilon| \cdot dV$$

$$S = k \cdot \text{Sum}_{\text{strains}}$$

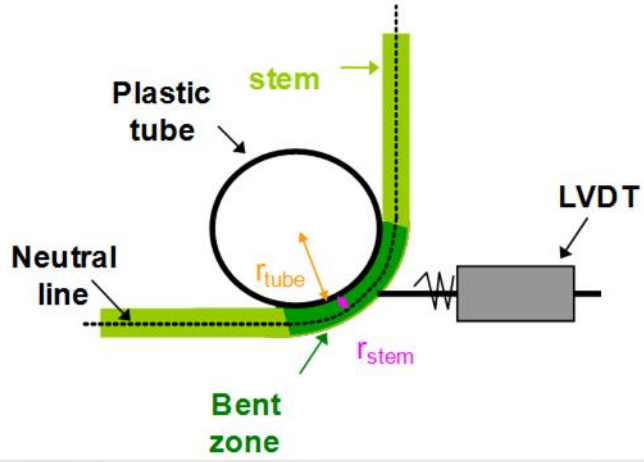
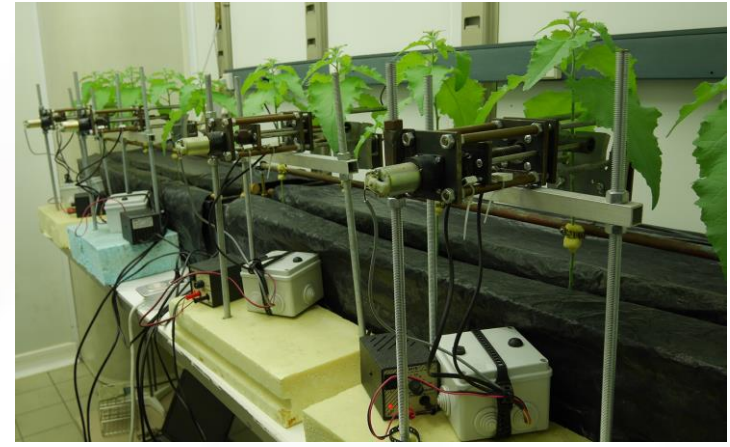


Coutand et Mouliat, 2000  
Coutand, Martin et al., 2009

# Dispositif expérimental

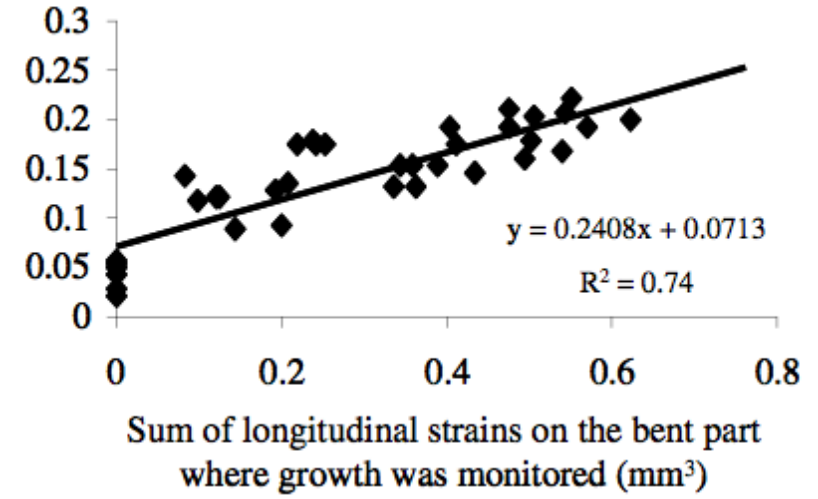
## En laboratoire

**Populus alba x tremula**  
croissance juvénile rapide,  
génomme séquencé,  
cultivable *in vitro*,  
facilement transformable



Amplitude de la flexion contrôlée en utilisant différents gabarits, flexion de 10s de la tige

Taux de croissance journalier du diamètre (mm/jour)

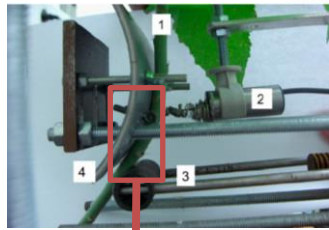


Coutand, Martin et al., 2009

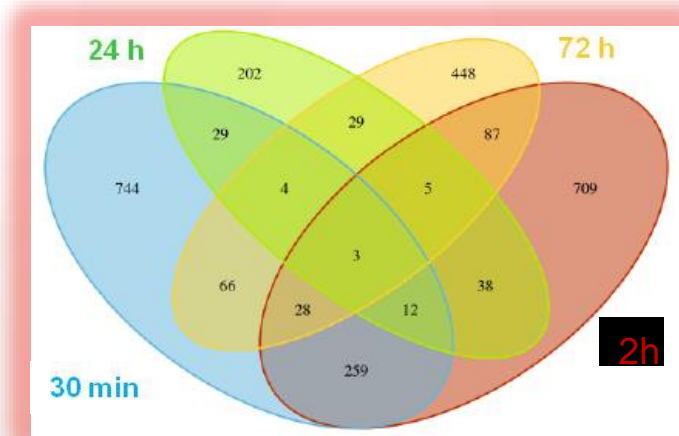
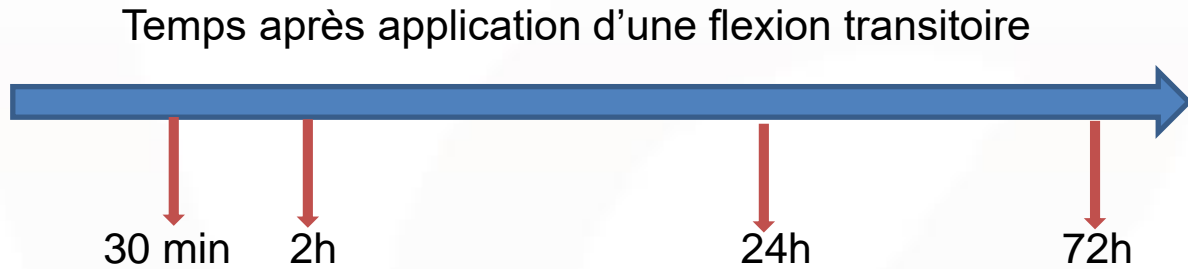
Corrélation linéaire entre la croissance radiale de la tige et la somme des déformations appliquées à la tige

Déformation= un paramètre physique clé perçu par les cellules

# Analyse globale des gènes régulés par la flexion chez le peuplier

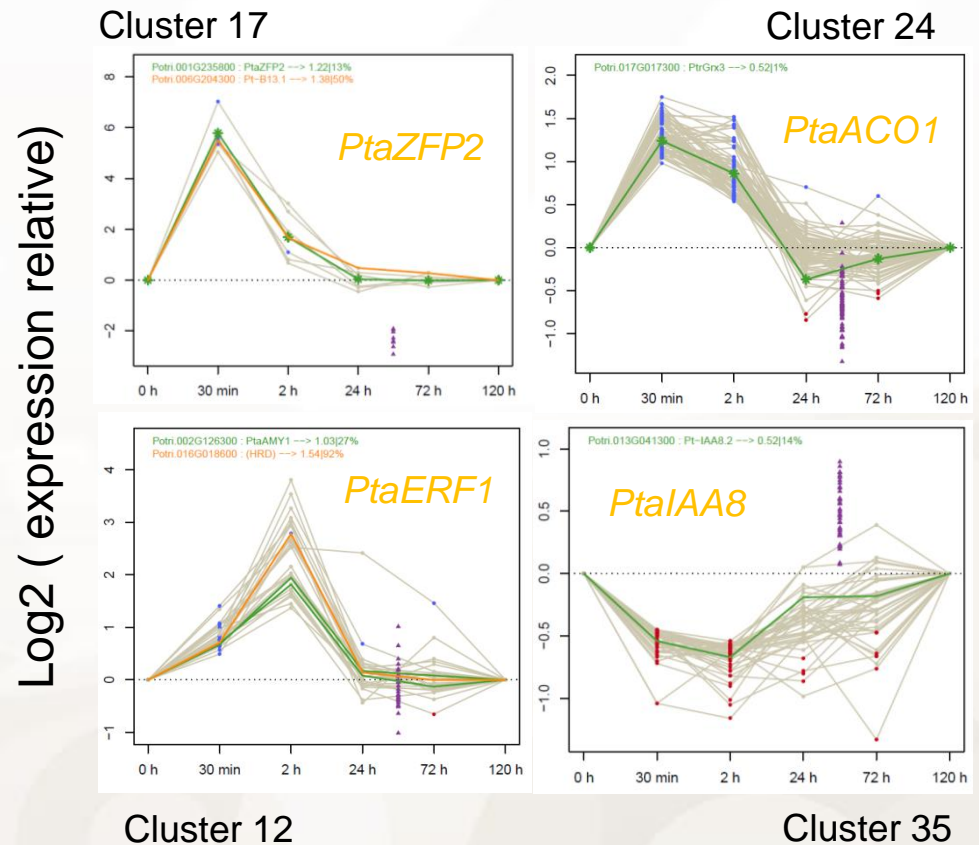


Zone fléchie

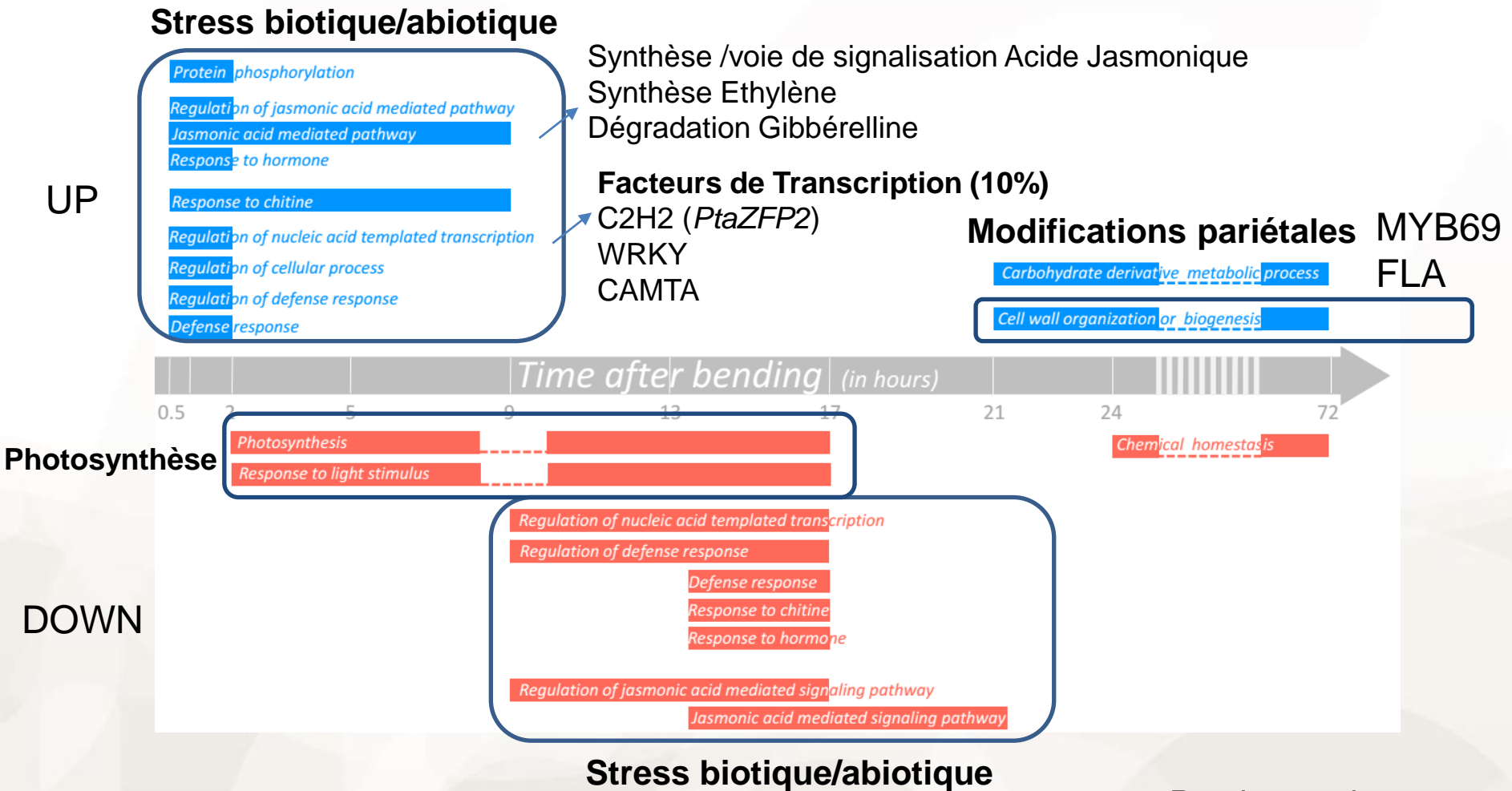


Distribution des 3179 gènes régulés par la flexion

Pomies et al., 2017



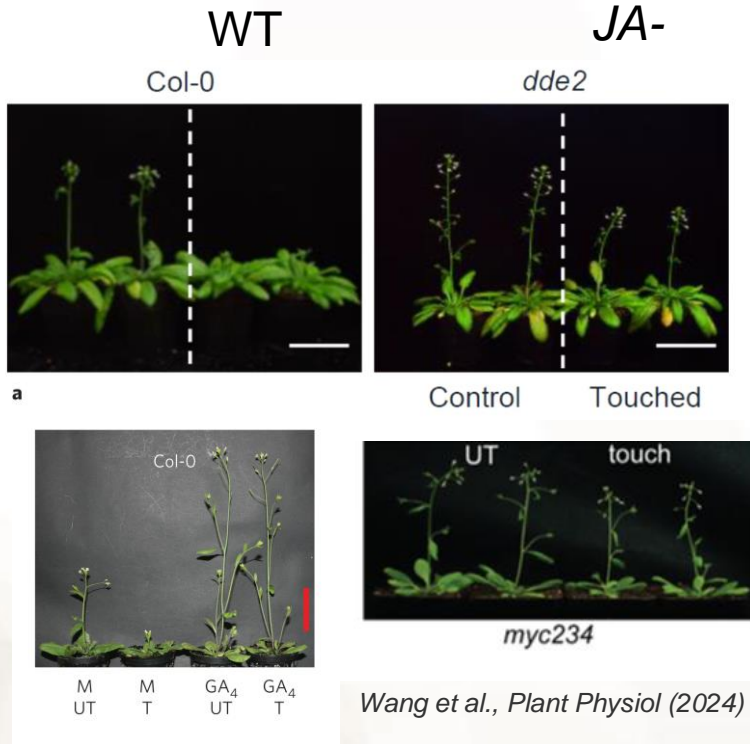
# Cinétique des processus biologiques "majeurs" suite à une flexion chez le peuplier



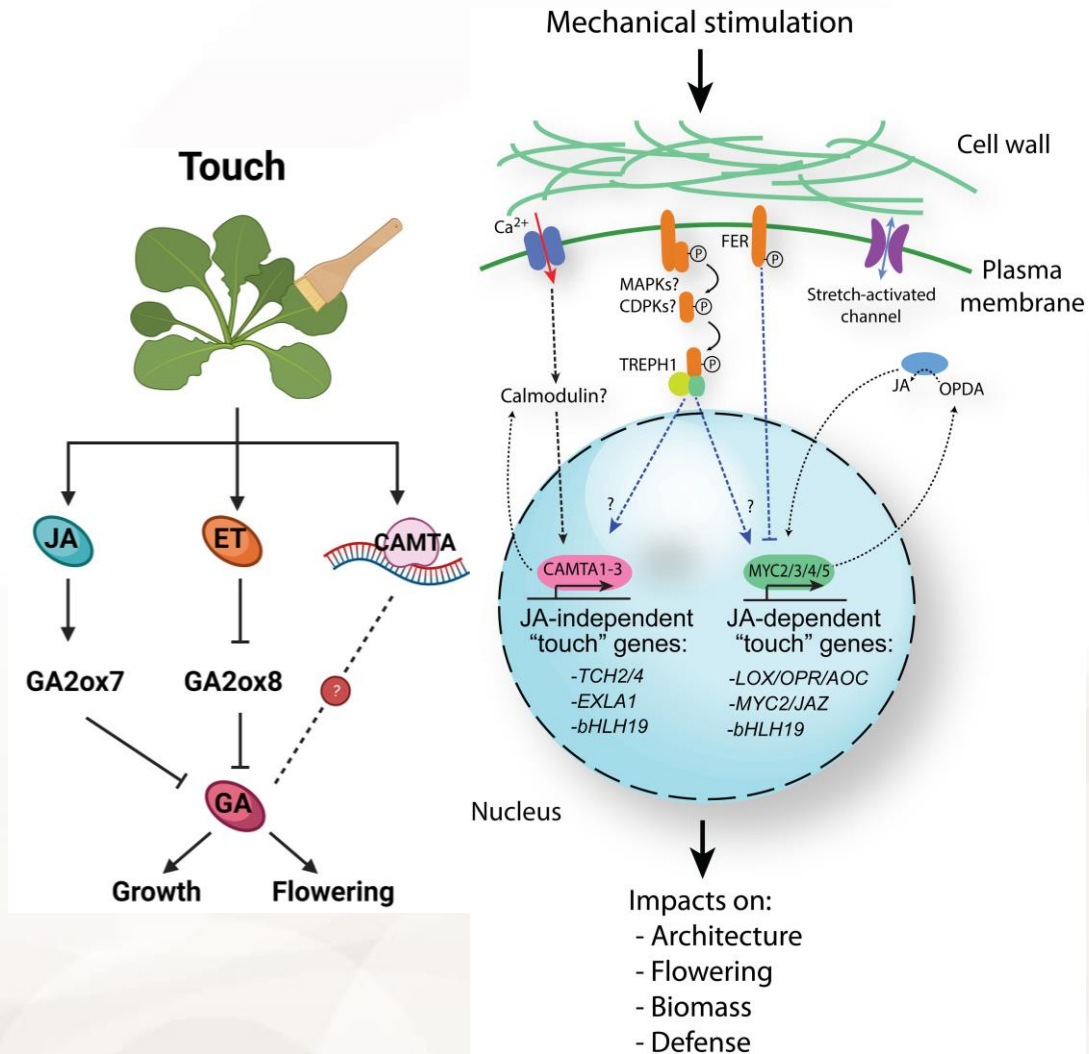
Pomies et al., 2017

# Rôle du JA, GA et du Calcium suite au toucher chez Arabidopsis

## Analyse de Mutants



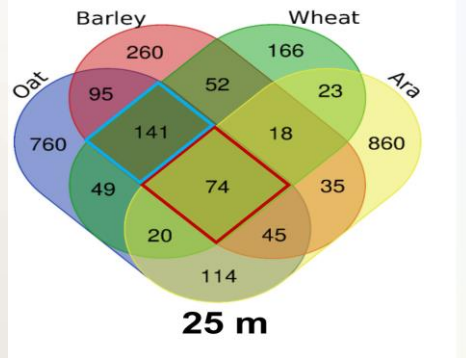
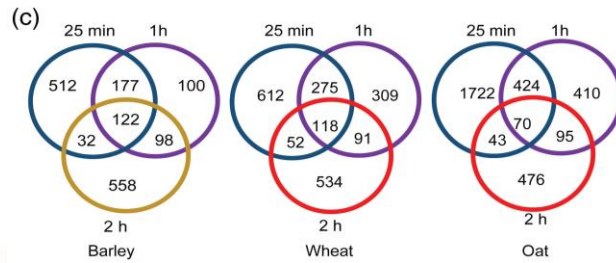
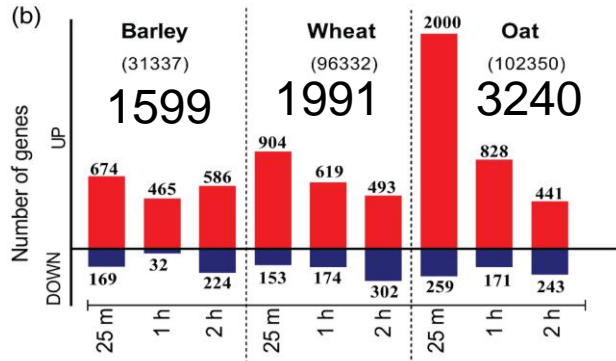
GA



Darwish et al., 2022 Sciences advances

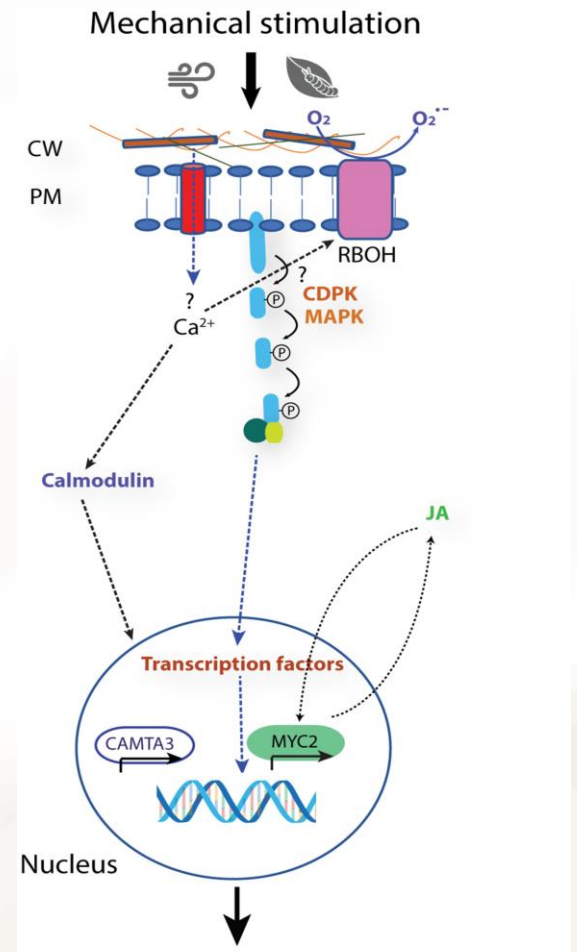


# Dynamique de l'expression des gènes sensibles au toucher chez les céréales



- Common4 KEGG/PFAM**
- Cell wall biogenesis (UGD, cellulose synthase, XTH)
  - Transcription factors (MYB, WRKY, EREBP, ZF)
  - Trehalose 6-phosphate synthase/phosphatase
  - Response to stress (HSPRO2, RPS2, RPM1)
  - JA metabolism & signalling (JAZ, OPR3)
  - Gibberellin catabolism (GA2ox, DELLA)
  - Ethylene biosynthesis (ACC synthase)
  - ABA catabolism (ABA 8'-hydroxylase)
  - Calcium-binding protein (CML, CBP)
  - Response to stress (EDS1, LEA, ERD)
  - Flowering control (CONSTANS)
  - RNA degradation (CCR4/CAF1)
  - Protein kinases (MAPK, CDPK, RLK)
  - Calcium-transporting ATPase
  - Photosystem II protein (LHCB)
  - Histone modification (JMJ)
  - Auxin signalling (SAUR)
  - Light signalling (PIF3/4)
  - Circadian rhythm (LHY)
  - Polyamine oxidase
  - ABC transporter
  - Aquaporin (TIP)
  - dnaJ Chaperone
  - Ubiquitin ligase
  - Syntaxin

- Oat/barley/wheat-specific KEGG/PFAM**
- Ω-hydroxypalmitate O-feruloyl transferase
  - Trans-resveratrol di-O-methyltransferase
  - Tricetin 3',4',5'-O-trimethyltransferase
  - Acetylserotonin O-methyltransferase
  - Anthranilate O-methyltransferase
  - Phenylalanine/tyrosine ammonia-lyase
  - Sucrose:sucrose fructosyltransferase
  - Ethylene biosynthesis (ACC oxidase)
  - SA catabolism (SA 3-hydroxylase)
  - Protein kinases (UMP/CMPK, Pto)
  - Transcription factors (TUBBY)
  - Cell wall biogenesis (COBRA)
  - BR signalling (BAS1, BZR1)
  - Copper chaperone
  - Callose synthase



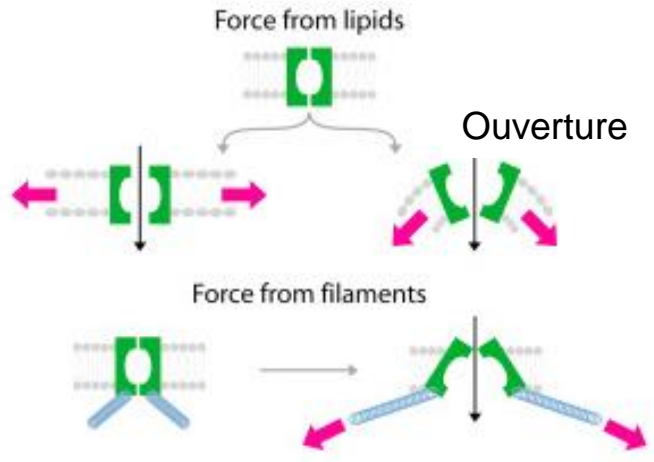
- General touch impact on plants**
- Plant Defense: biotic and abiotic stress
  - Jasmonic acid, Salicylic acid and Ethylene
  - Cell wall modification
  - Thigmomorphogenesis and flowering
- Cereal-specific touch impact**
- Suberin biosynthesis
  - Stilbene biosynthesis
  - Flavonoid biosynthesis
  - Melatonin biosynthesis

Darwish et al., 2023, Plant Journal

## 2 hypothèses :

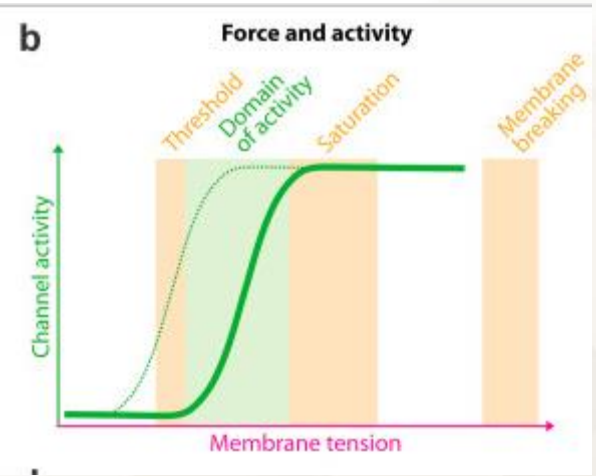
### (i) Les canaux ioniques mécano-sensibles :

- Protéines membranaires formant des pores dont l'ouverture régulée par l'augmentation de la tension membranaire
- mouvements d'ions (Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>)



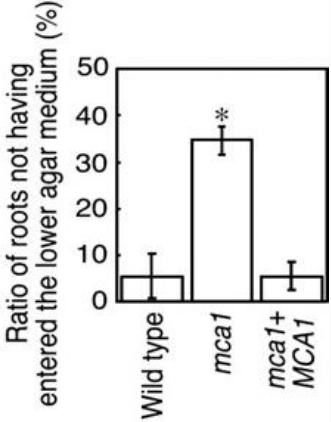
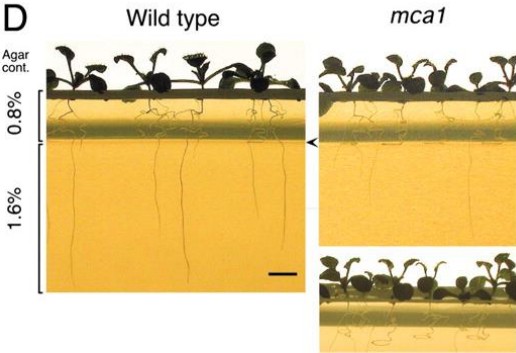
Guichard et al., 2022

C	Organism of reference	Structure and permeation
<b>MSL</b>	<i>E. coli</i> (MscS)	<p>out in Cl<sup>-</sup> A<sup>+</sup></p>
<b>OSCA</b>	<i>A. thaliana</i>	<p>out in Na<sup>+</sup> Ca<sup>2+</sup></p>
<b>Piezo</b>	<i>M. musculus</i> (Piezo1)	<p>out in Ca<sup>2+</sup> Cl<sup>-</sup></p>
<b>MCA</b>	<i>A. thaliana</i>	<p>out in Ca<sup>2+</sup> Cl<sup>-</sup> A<sup>+</sup></p>



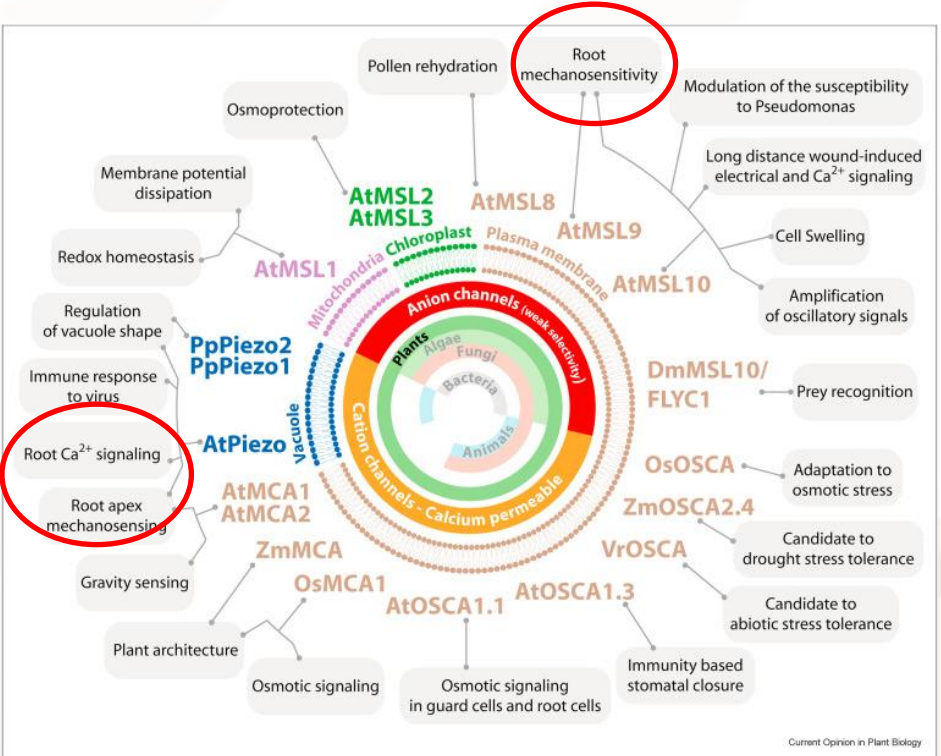
# Divers rôles des canaux ioniques MS dans le développement des plantes

## Les canaux MCA



Nakagawa Y. et al., 2007

**Arabidopsis plasma membrane protein crucial for Ca<sup>2+</sup> influx and touch sensing in roots**

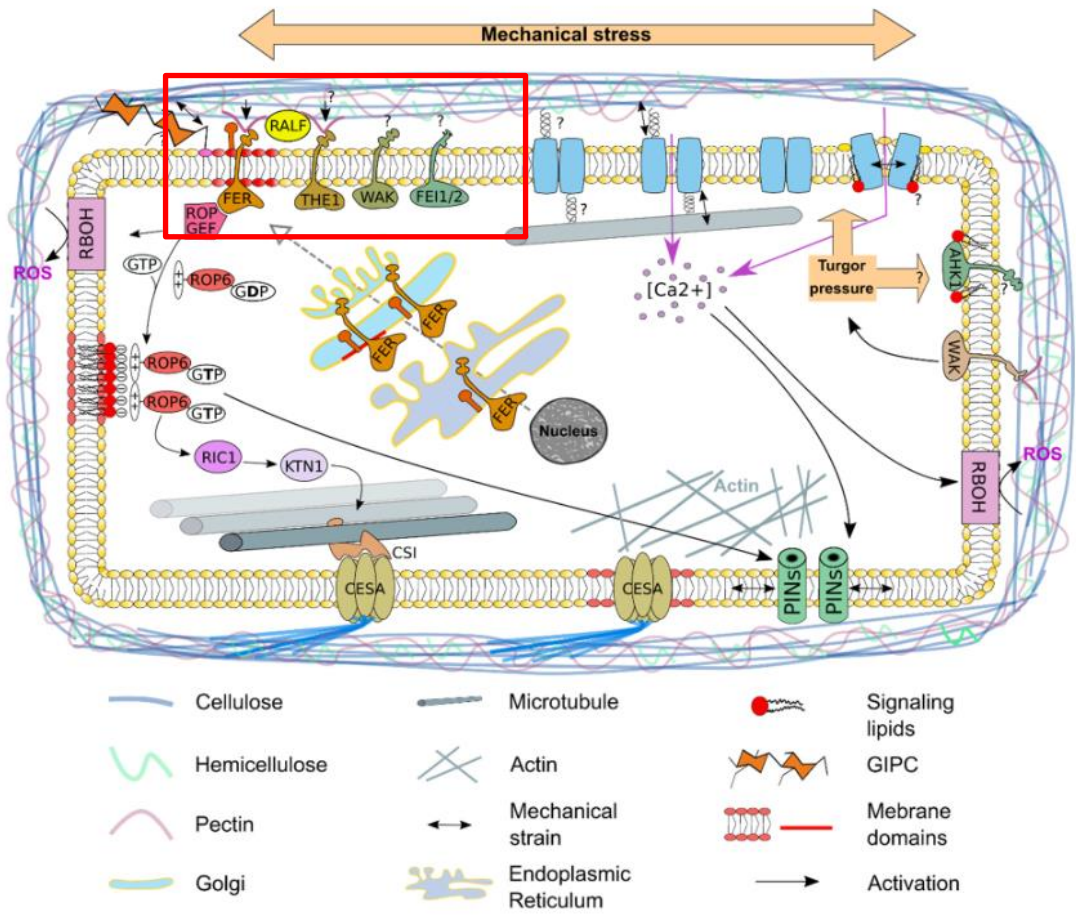


Guichard et al, 2022

# Perception du signal au niveau cellulaire

## 2 hypothèses :

### (ii) Le continuum cytosquelette - membrane plasmique – paroi (CPMW)



Plusieurs Classes de récepteurs-like-kinases  
-WAKS  
-crRLKs

Détection de dommages liés à la paroi

Ackermann et al., 2020

# FERONIA

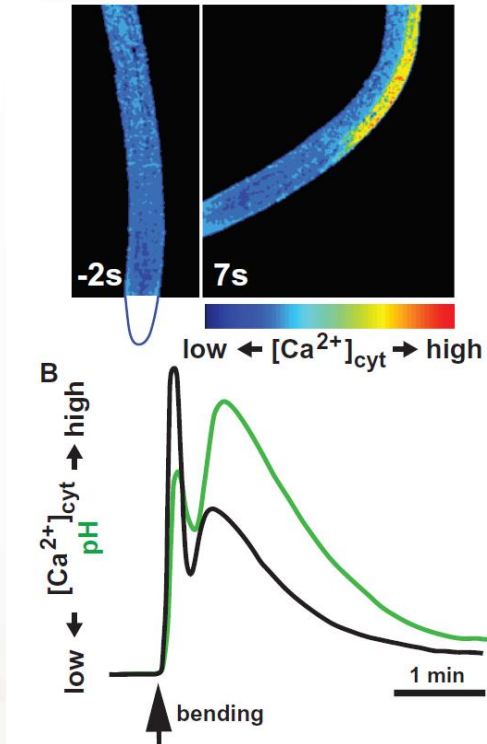


Figure 1. *Fer* Loss-of-Function Mutants Exhibit Impaired Ion Signaling in Response to Mechanical Stimulation

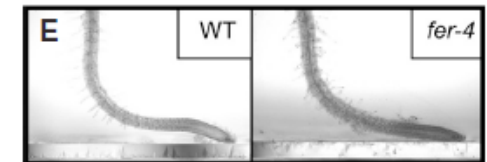
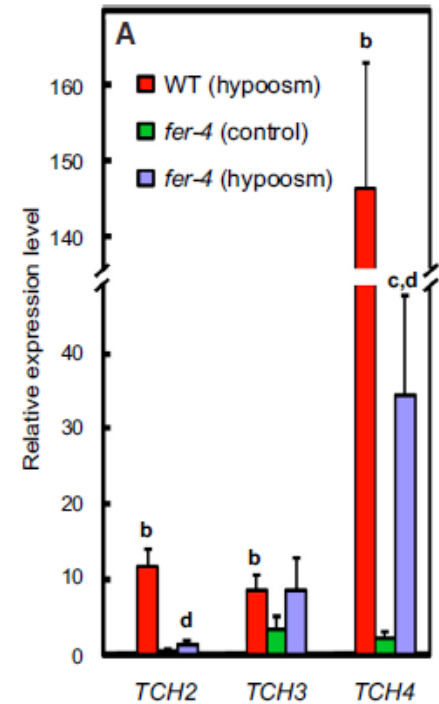
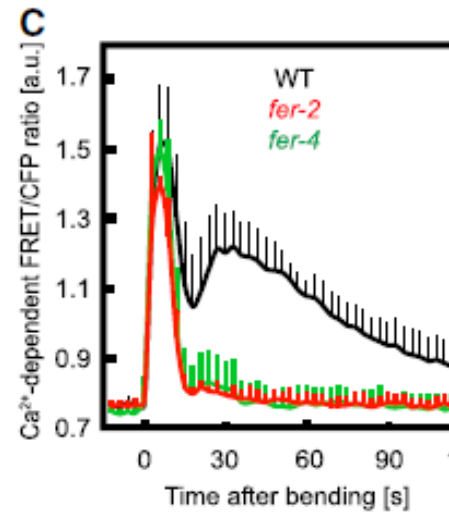
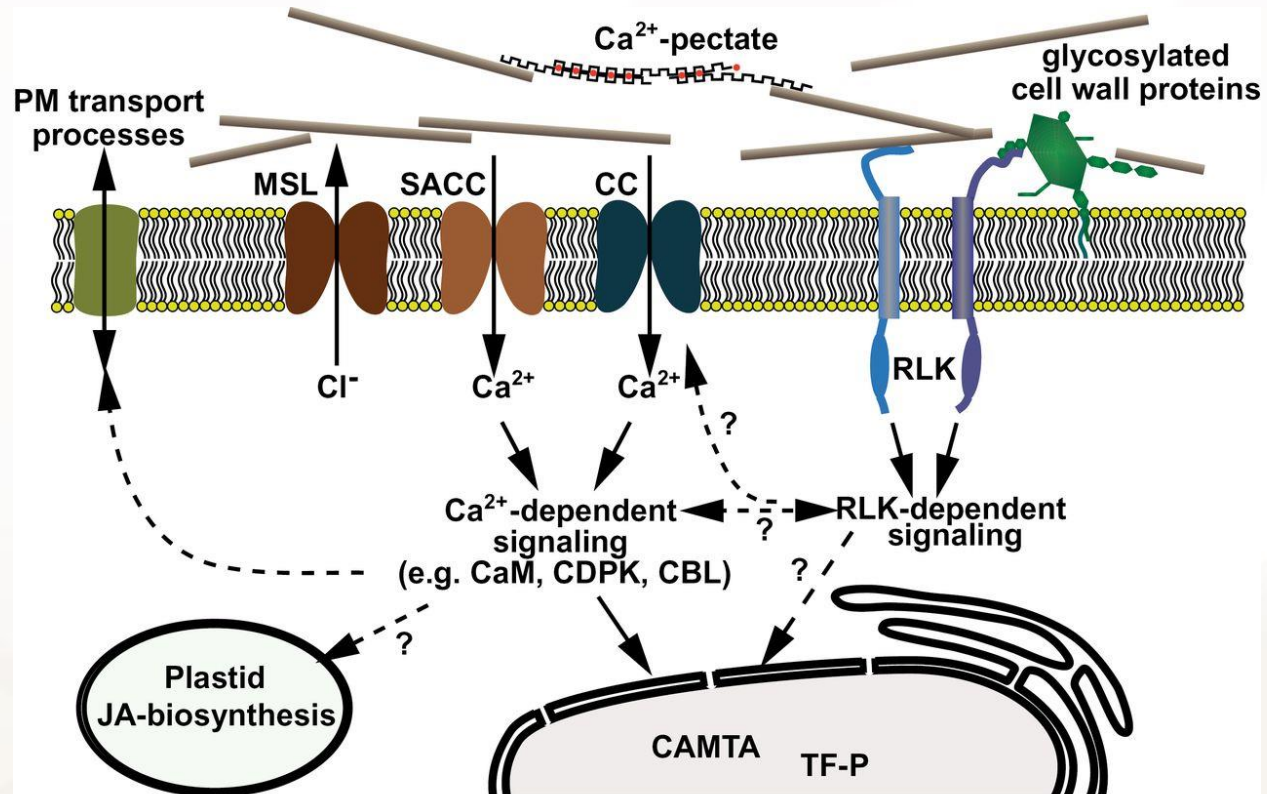


Figure 2. *Fer* Loss-of-Function Mutants Show Altered Transcriptional and Growth Responses to Mechanical Perturbation

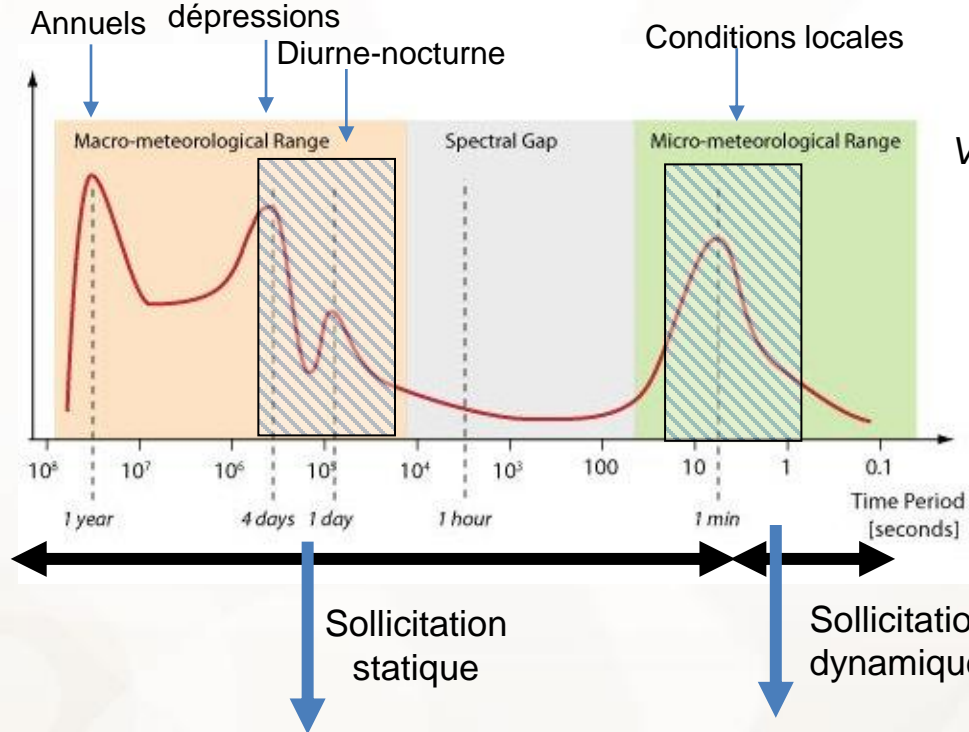
# Modèle de mécanoperception et transduction du signal



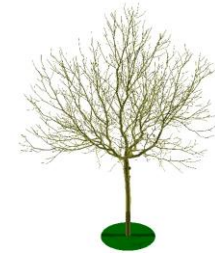
Monshausen et Haswell, 2013

## II. La nature fluctuante du vent: effet des sollicitations répétées

Puissance de la vitesse du vent

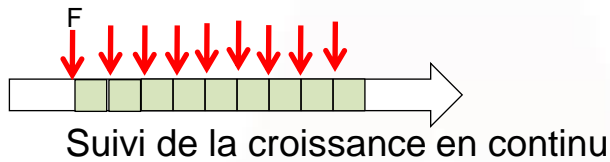


Van der Hoven

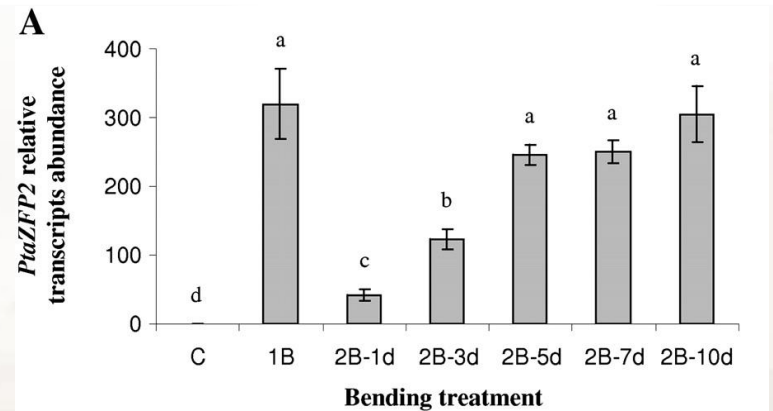
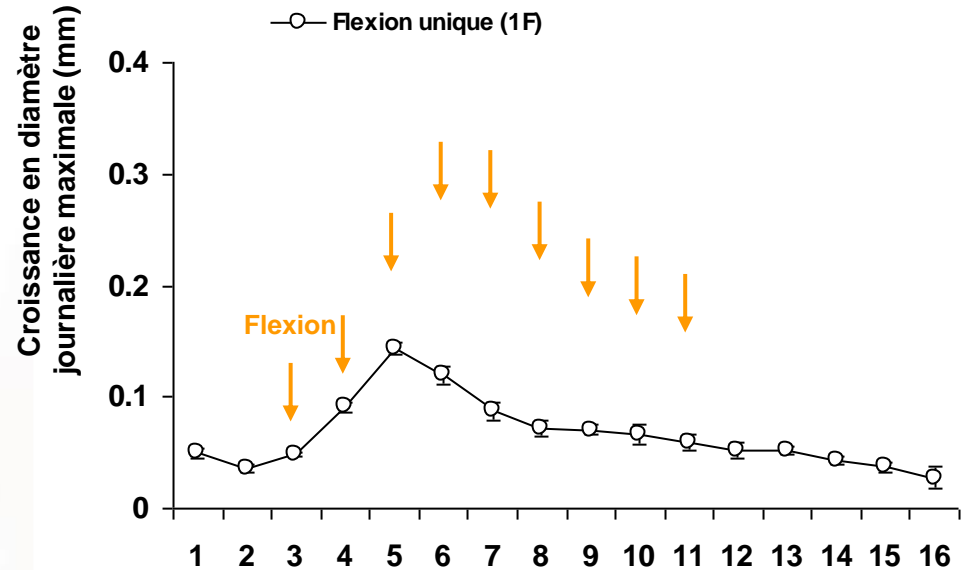
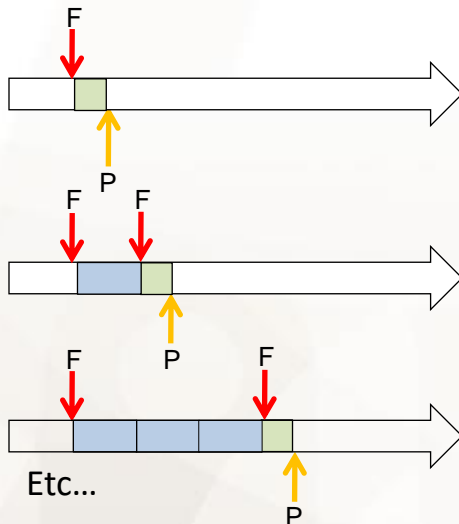


# Effet de flexions répétées statiques sur la croissance des peupliers

Martin et al. 2010



Une réponse de croissance en diamètre modifiée au delà de la 3ème flexion.



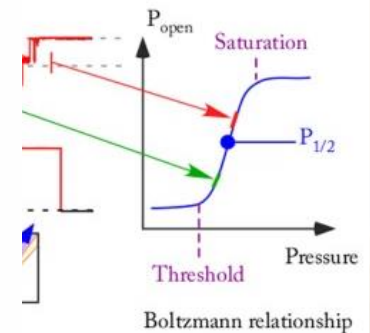
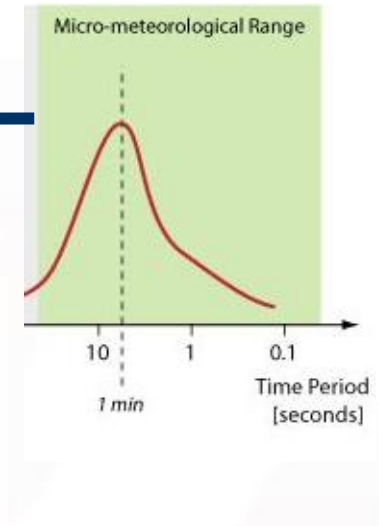
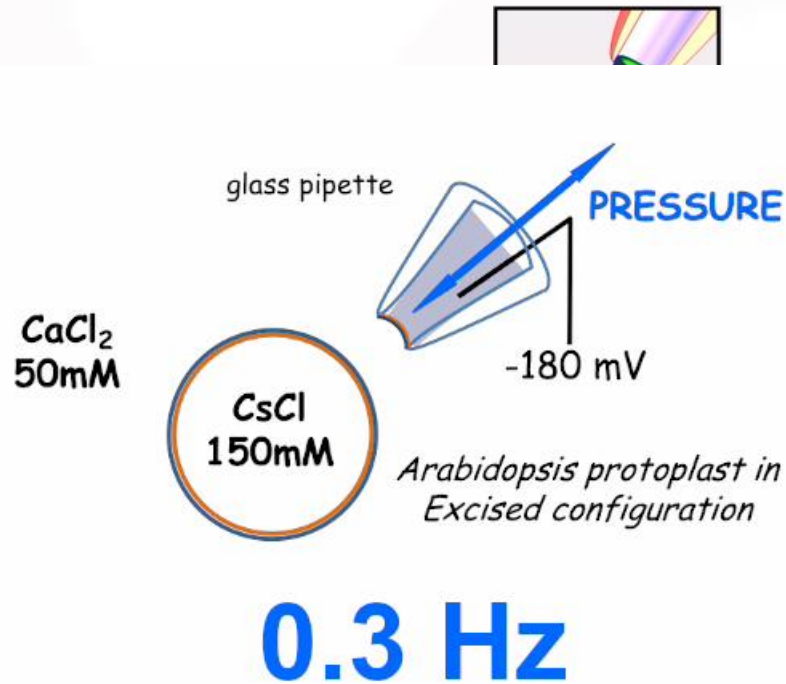
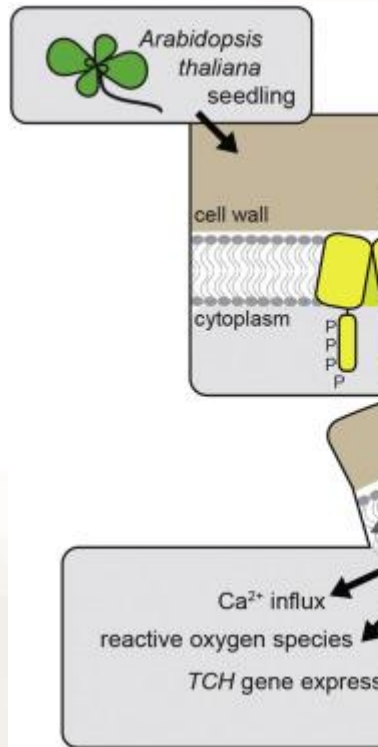
↳ Désensibilisation des peupliers lors de flexions successives

↳ Retour progressif à un état complet de sensibilité au bout de 5 jours

↳ **Acclimation de la sensibilité à la flexion : accommodation**



# Effet de sollicitations dynamiques

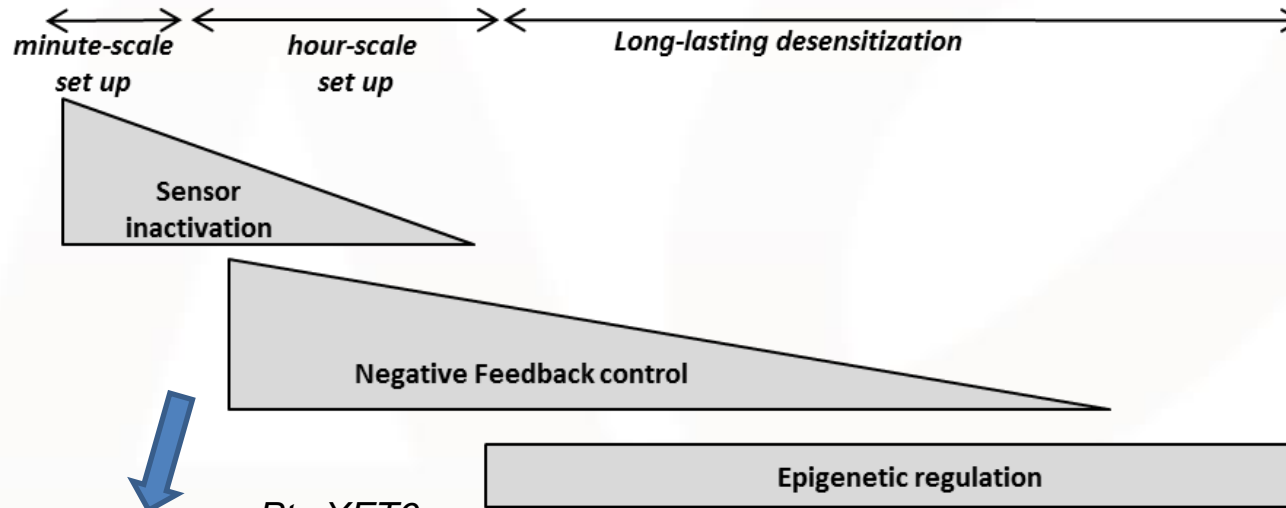


L'activité des canaux est plus importante lors d'une stimulation par pression oscillante que lors d'une stimulation par pression statique.

Diminution de l'activité du canal lors de l'augmentation de la fréquence d'excitation de 4 à 20 Hz

# Les questions en suspens

Comment expliquer ce phénomène de désensibilisation?

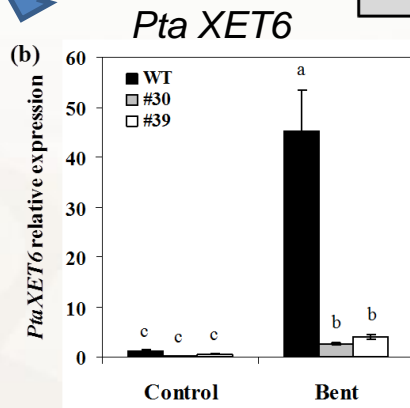


Putative mechanisms



Reduction of primary growth

Martin et al., 2014



Atténuation des réponses moléculaires dans des plantes transgéniques de peuplier sur-exprimant PtaZFP2

Leblanc-Fournier et al., 2014

Approche modélisation réseau de gènes ?

# L'acclimatation au vent : une chaîne stimulus-perception - réponse – avantage adaptatif

Stimulus extérieur



$$F = \frac{1}{2} \rho C A U^2$$



Chargement de la structure

Echelle sur la semaine/année



Echelle sur la journée



Echelle de la seconde/minute



Chargement local

$$\varepsilon_{zz}(r, \theta)$$

Processus d'acclimatation

Activation canaux

Perception cellulaire

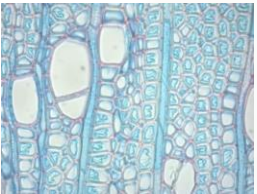
Signaling

Transport de signaux

Activations moléculaires

Avantage adaptatif

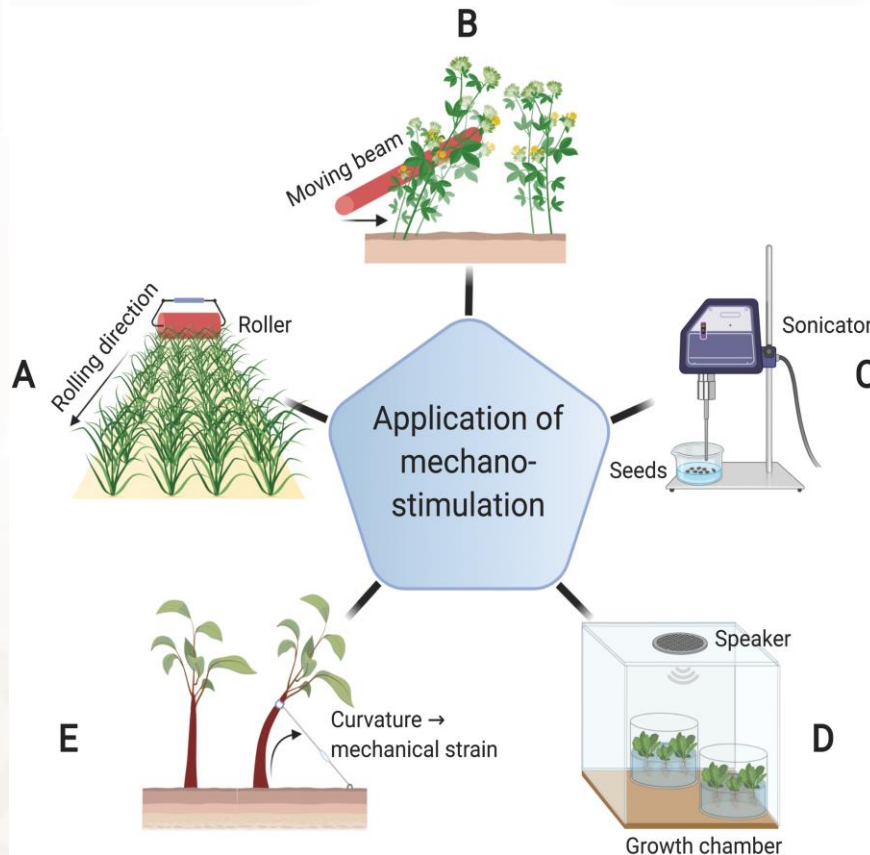
Modification du développement de l'arbre



# III. La mécano-stimulation : une alternative prometteuse pour les pratiques agricoles durables



**Mugifumi**, un travail agricole bénéfique  
Hidetoshi I.  
(2014)



Exemples de méthodes

Les sollicitations mécaniques comme régulateurs de croissance

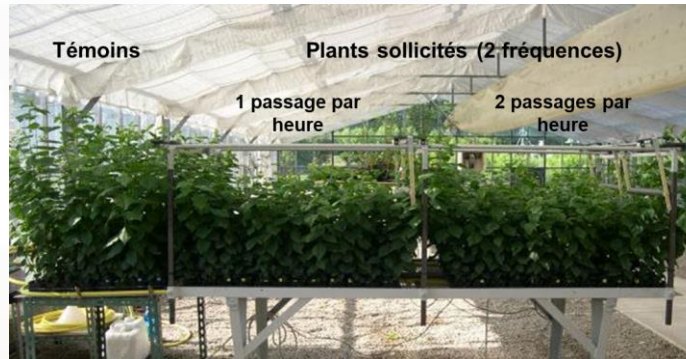
L'amorçage de la défense des plantes fait l'objet d'une attention croissante, car il constitue une solution prometteuse pour la protection des cultures

Ghosh et al (2021) J.Exp Botany

# Utilisation des sollicitations mécaniques pour contrôler les dimensions et le port des plantes

- ◆ En serre, les plantes sont quasiment privées de sollicitations mécaniques
  - ➔ Plantes grêles et mécaniquement fragiles
  - ➔ Utilisation de raccourcisseurs chimiques ayant un effet « nanifiant » sur les plants

## Jeunes plants de pêchers



Effet sur la stabilité mécanique des plants

## Jeunes plants de rosiers



**Les sollicitations mécaniques appliquées limitent la croissance longitudinale et augmentent la ramification**

Morel et al., 2012

# C@SPER : Un système innovant pour équiper les serres de production



FIGURE 4 : CHARIOT DOUBLE RAIL POLYVALENT ARROSAGE/REGULATION/PIEGEAGE COMMERCIALISE PAR PYRENE AUTOMATION

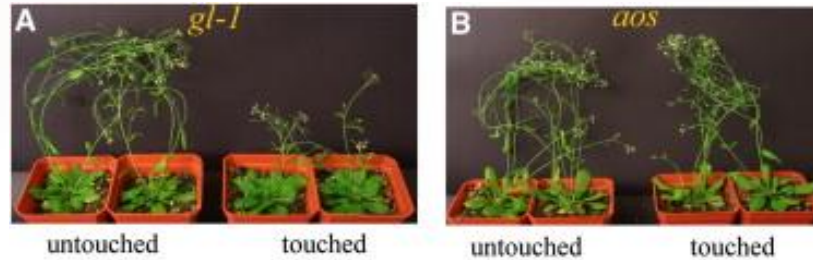
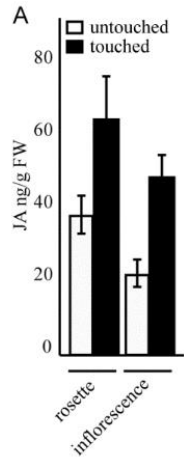


FIGURE 2 : DIPLADENIA STIMULES MECANIQUEMENT (GAUCHE) ET PLANTES TEMOINS SANS STIMULATION (DROITE)

**ASTREDHOR**  
SUD-OUEST  
GIE Fleurs et Plantes

# Protection croisée vent/stress biotique

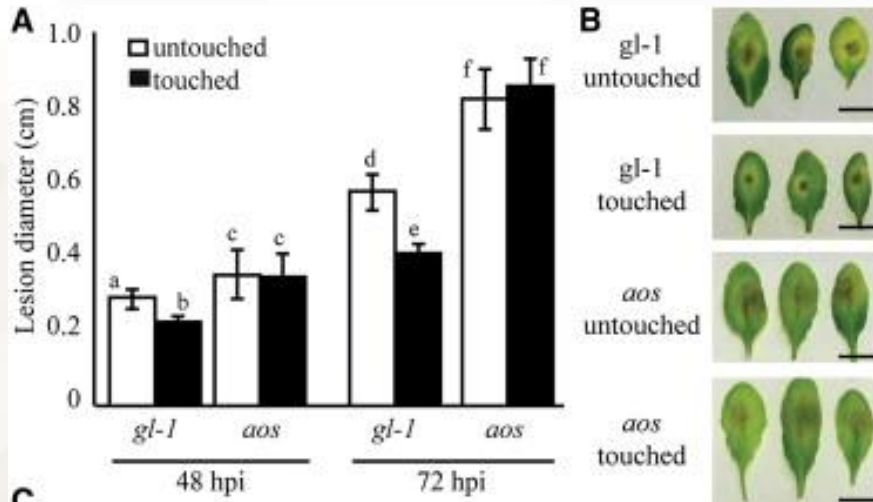
Syl **Acide jasmonique (JA) après toucher**



Mutant d'Arabidopsis (*aos*) défectueux dans la biosynthèse de JA

Touchées 2f/j 4 semaines

JA est nécessaire à la thigmomorphogénèse



Des sollicitations mécaniques répétées renforcent la résistance aux maladies d'Arabidopsis de manière dépendante de JA.

*B. cinerea*



# Equipe MECA



Ecophysiology

Modelling

Biomechanics

Image analysis

Cellular Biology

Functional genomics



S. Ploquin



B. Moulia



Félix Hartmann



E. Badel



C. Lenne



N. Brunel



V. Legué



J.L. Julien



M. Decourteix



J. Franchel



N. Leblanc



# Double avantage de la blessure mécanique dans l'amélioration de la tolérance au froid et de la résistance à la verse chez les plants de blé

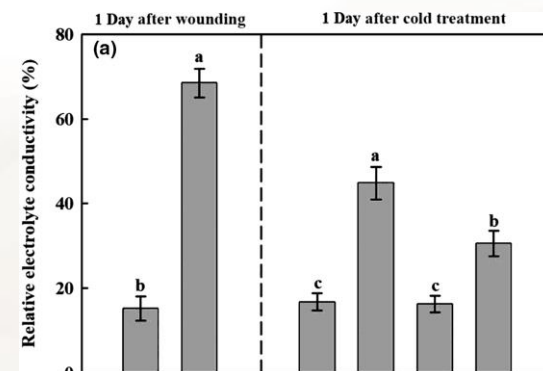
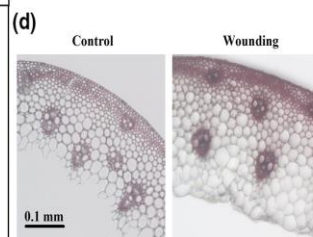
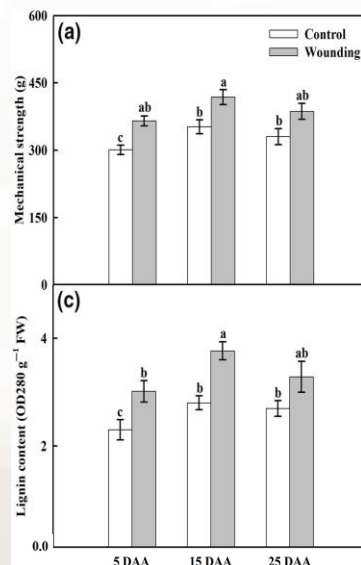
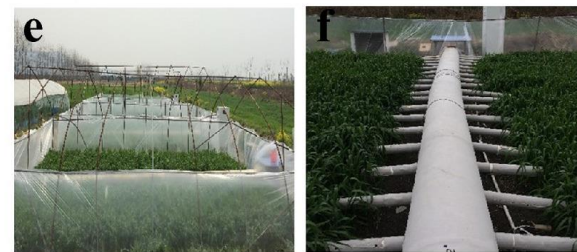


**Mugifumi**, un travail agricole bénéfique Hidetoshi I. (2014)

## Sollicitations mécaniques



## Froid (5°C)



Si, T., et al (2019) Plant Biol J