Ajustements des propriétés mécaniques et hydrauliques du bois formé sous contraintes environnementales

Réunion CAQSIS 2018

Benjamin Niez

Co-encadrants : Eric Badel, Jana Dlouha

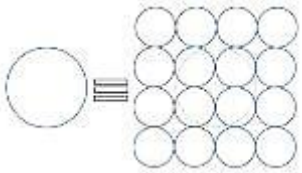
Directeur de thèse : Bruno Moulia

Partie bibliographique

- Le bois est un matériau complexe assurant les fonctions vitales de l'arbre :
  - Le support mécanique de l'arbre
  - La conduction de la sève brute
- Anisotropie structurale du bois => propriétés anisotropiques : *l'étude porte sur les propriétés longitudinales*

- <u>Propriétés hydrauliques :</u>
  - **Conductivité hydraulique :**
    - Loi de Poiseuille :

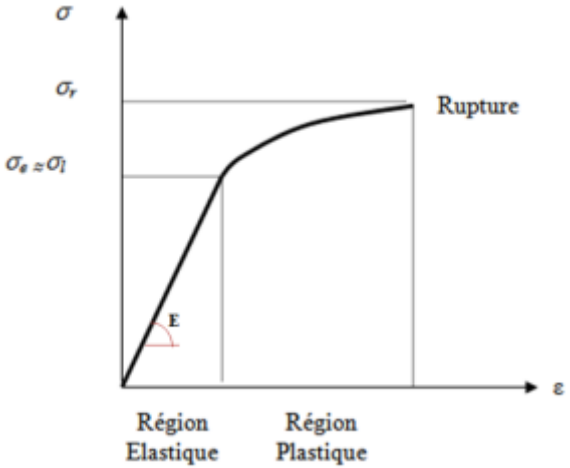
$$Q = \frac{\pi * r^4 * \Delta P}{8 * \eta * L} = \frac{K_H * \Delta P}{L}$$



  - **Sensibilité à la cavitation :**
    - La colonne d'eau est sous pression négative
    - Formation d'une embolie gazeuse

      => Arrêt du flux de sève

- <u>Propriétés mécaniques :</u>
  - Domaine élastique
  - Endommagement
  - Rupture



Partie bibliographique

- Changements climatiques :
  - Plus d'évènements exceptionnels : tempêtes et sècheresse (Chauveau *et al.* (2013), Haarsma *et al.* (2013))
  - Conditions de croissance modifiées => formation et propriétés du bois

- Impacts du stress mécanique :
  - Croissance **primaire ralentie** mais **secondaire accrue** *(Coutand et al. 2009 ; Pruyn et al. 2000)*
  - Thigmomorphogénèse *(Jaffe 1973)*
  - Propriétés du bois :
    - Module d'Young plus faible mais E*I plus élevée sur Abies Fraseri *(Telewski 1989)*

- Impacts du stress hydrique :
  - Croissance **primaire et secondaire ralentie** (*Awad et al. (2010);Giovannelli et al.(2007))*
  - Propriétés du bois : *(Rosner et al. 2008)*
    - Augmentation de la densité et du module d'Young
    - Meilleure résistance à la cavitation

Problématiques

- **Hypothèses :**
  - L'acclimatation à des sollicitations mécaniques est-elle possible en cas de sècheresse ?
  - L'acclimatation est-elle un bénéfice adaptatif pour l'arbre ?

- **Méthode :**
  - Croissance de jeunes peupliers sous stimuli contrôlés
  - Caractérisation de l'impact de stress abiotiques (mécanique et hydrique) sur la croissance et les propriétés de la tige

Application d'un stress mécanique

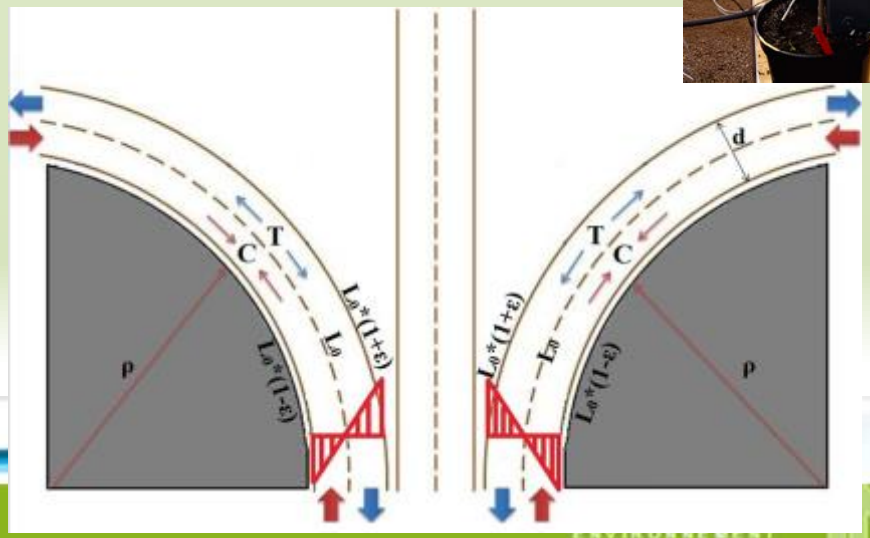
- **Principe :** contrôler le niveau de déformation maximale (1%) appliquée en périphérie de la tige

- 2016 :
  - **Sollicitations asymétriques**
  - Sur plants **bien irrigués**
  - Sur plants sous **stress hydrique** (pilotage automatisé)

- Méthode :

$$\varepsilon = \frac{d}{2 * \rho + d}$$

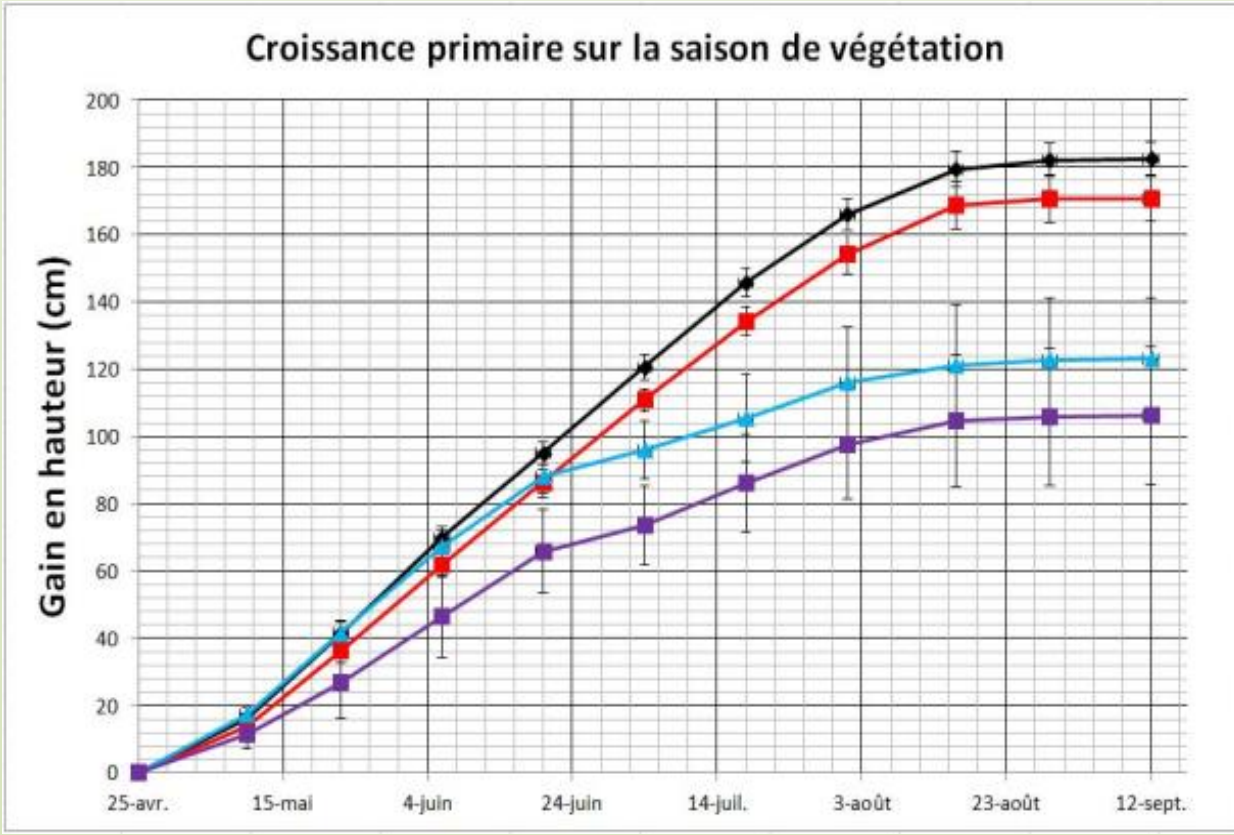
- 2017 :
  - 2 types de sollicitations : **asymétriques** et **symétriques**
  - Sur plants **bien irrigués**



Croissance primaire

- **Ralentissement** de :
  - **6%** pour les **SM**
  - **14%** pour les **SMH**

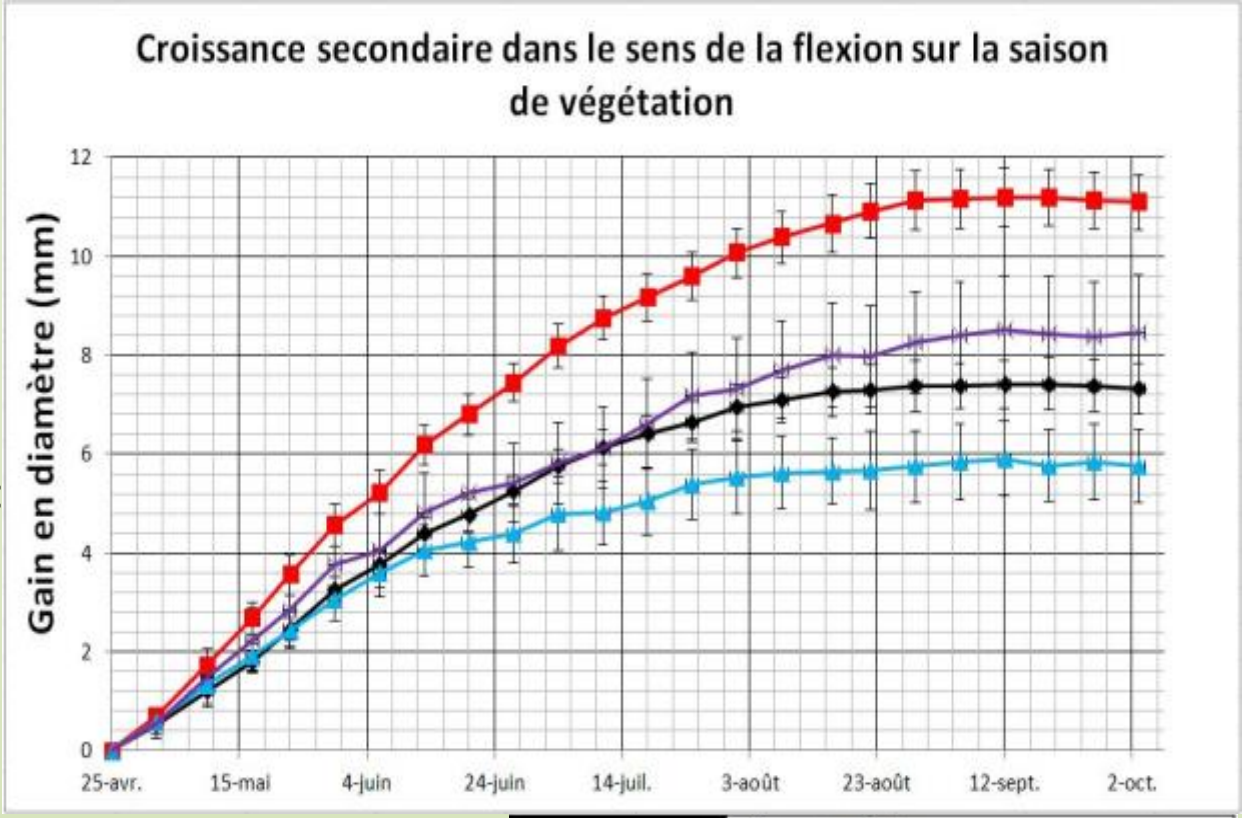
- Croissance des plants sous **stress hydrique** égale à **2/3** de celle de leur **témoin**



	Témoin (T)
	Stress hydrique (SH)
	Stress mécanique (SM)
	Stress simultanés (SMH)

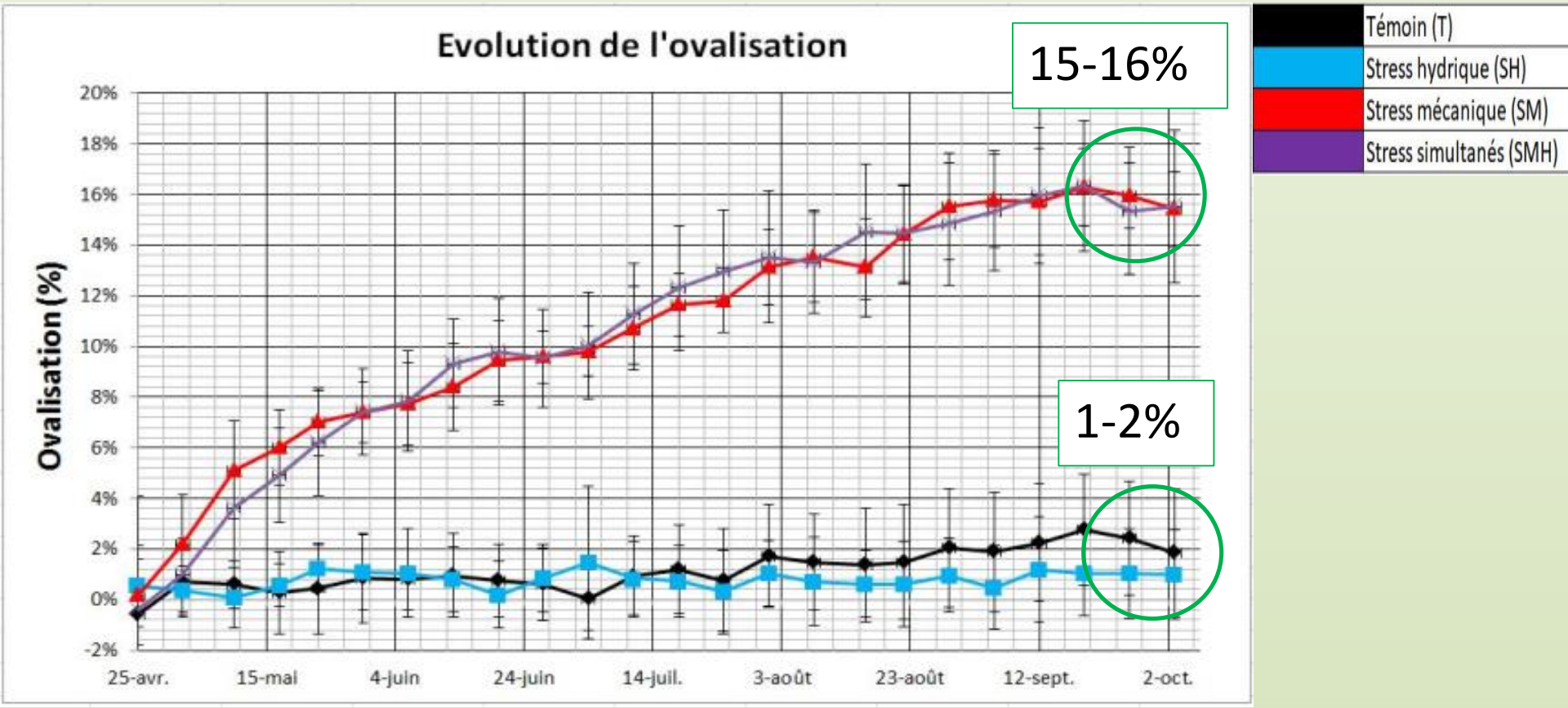
Croissance secondaire
- Sens de la flexion -

- Impact du stress **mécanique** :
  - Croissance **50% plus importante**
- Impact du stress **hydrique** :
  - **Ralentissement** d'environ **23%**



	Témoin (T)
	Stress hydrique (SH)
	Stress mécanique (SM)
	Stress simultanés (SMH)

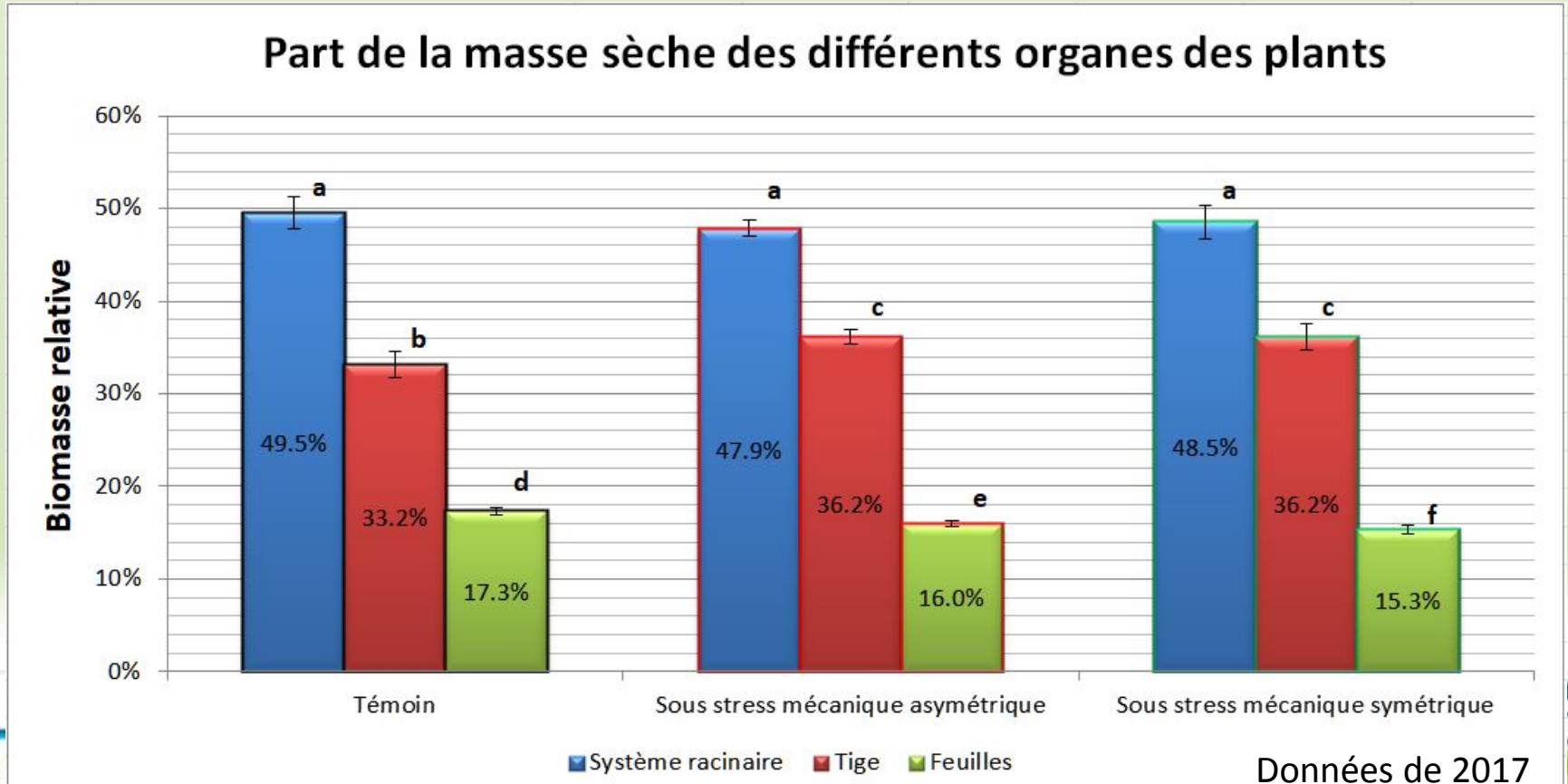
Ovalisation de section



- Le processus de **thigmomorphogénèse** est **indépendant** de **l'état hydrique** des plants
- L'acclimatation aux sollicitations mécaniques semble se réaliser en cas de sècheresse

Impact de stress mécaniques sur l'allocation de biomasse

- **Allocation** :
  - **Plus** importante dans la **tige**
  - **Moins** dans les **feuilles**
  - **Pas d'impact** sur les **racines** (peu sollicitées)
- **La biomasse totale augmente** pour les plants sous **stress mécanique** :
  - **8.3%** pour les stress **asymétriques**
  - **10.5%** pour les stress **symétriques**

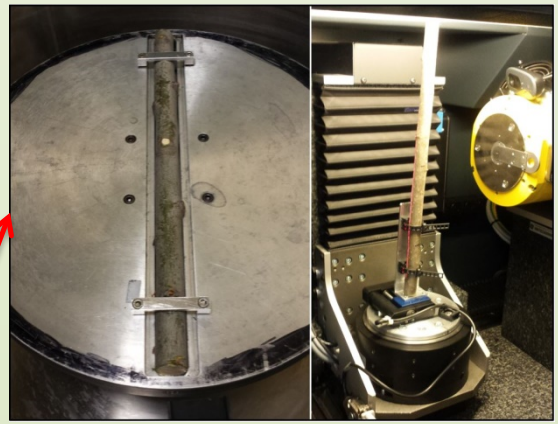


Données de 2017

Caractérisation des propriétés fonctionnelles de la tige

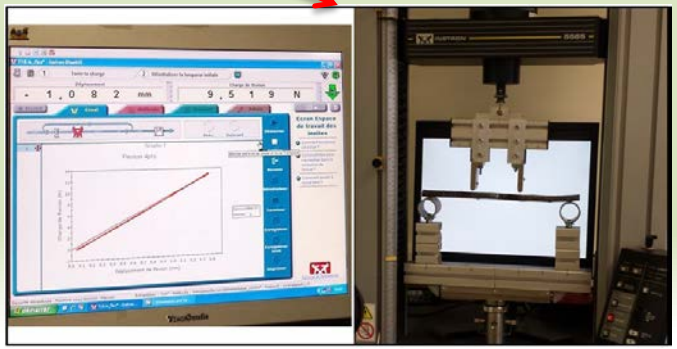
- **<u>Sensibilité à la cavitation :</u>**
  - Caractériser l'impact des stress abiotiques inter-échantillons et intra-échantillons

=> Uniquement sur **2016**



- **<u>Propriétés élastiques de tige :</u>**
  - Caractériser la modulation de la rigidité de flexion des tiges (EI) et module d'élasticité (E)

=> Sur **2016** et **2017**

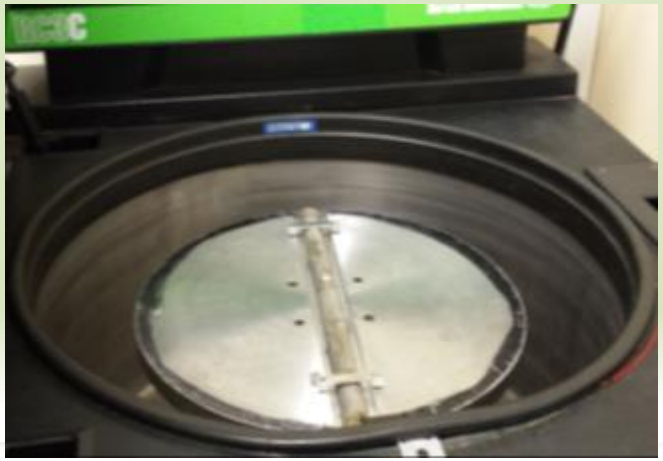


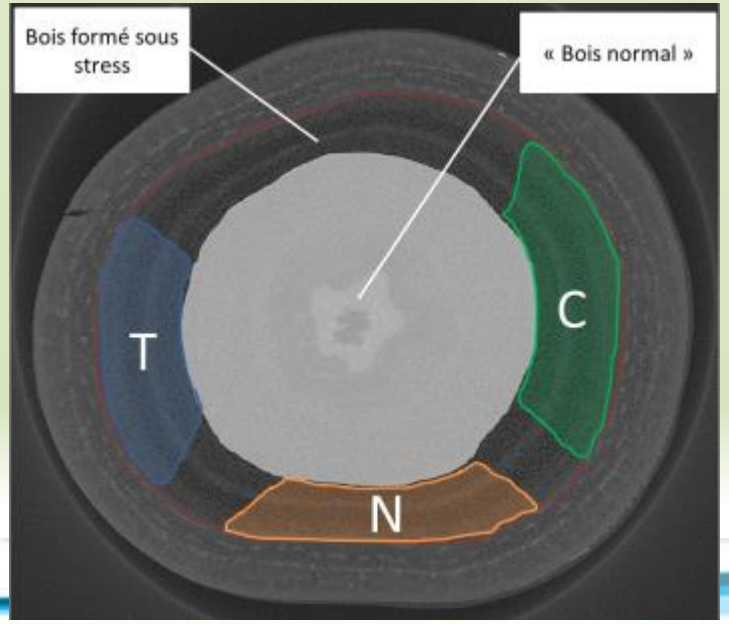
Sensibilité à la cavitation : outils

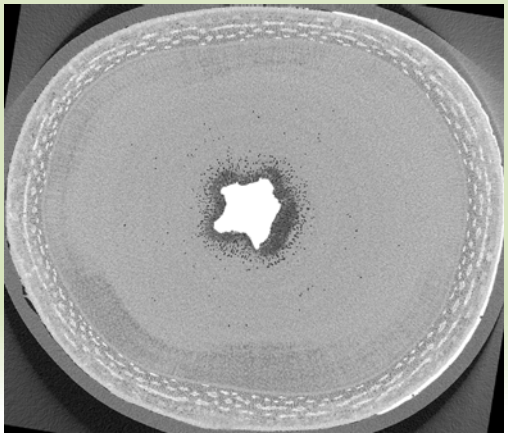
- **Objectif** : déterminer **localement** la **sensibilité à la cavitation** du bois formé sous stress

- **Centrifugeuse :**
  - Application de **11 niveaux de tension** : 0 à 4 MPa

- **Microtomographie à rayons X :**
  - **Observations locales** de la propagation de l'embolie gazeuse



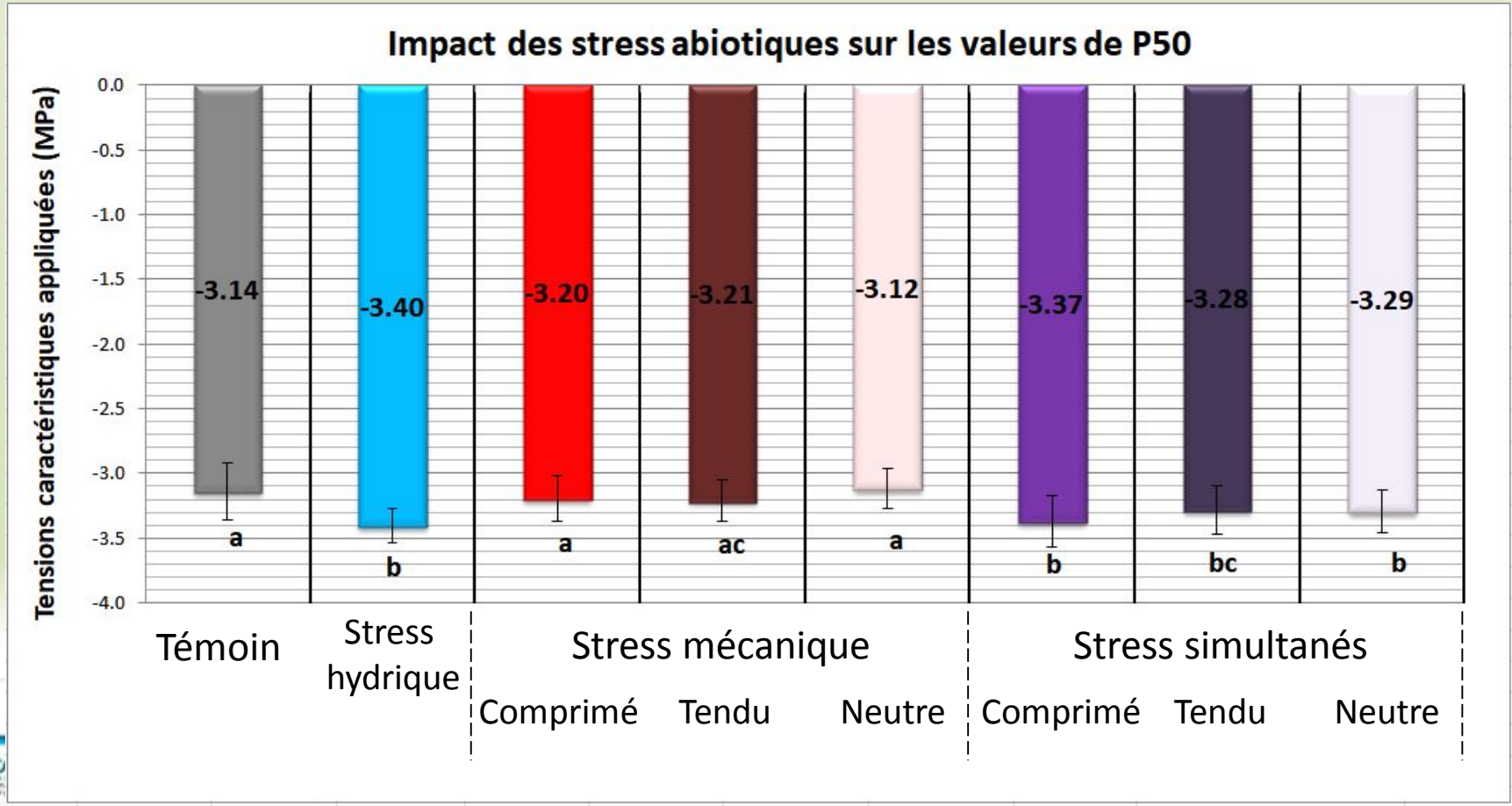




Résultats inter-échantillons

- **Aucun impact significatif** d'un stress **mécanique** sur la résistance à la cavitation
- **Impact positif** d'un **stress hydrique** sur la résistance à la cavitation

=> **Pas d'interaction** entre les deux stress abiotiques

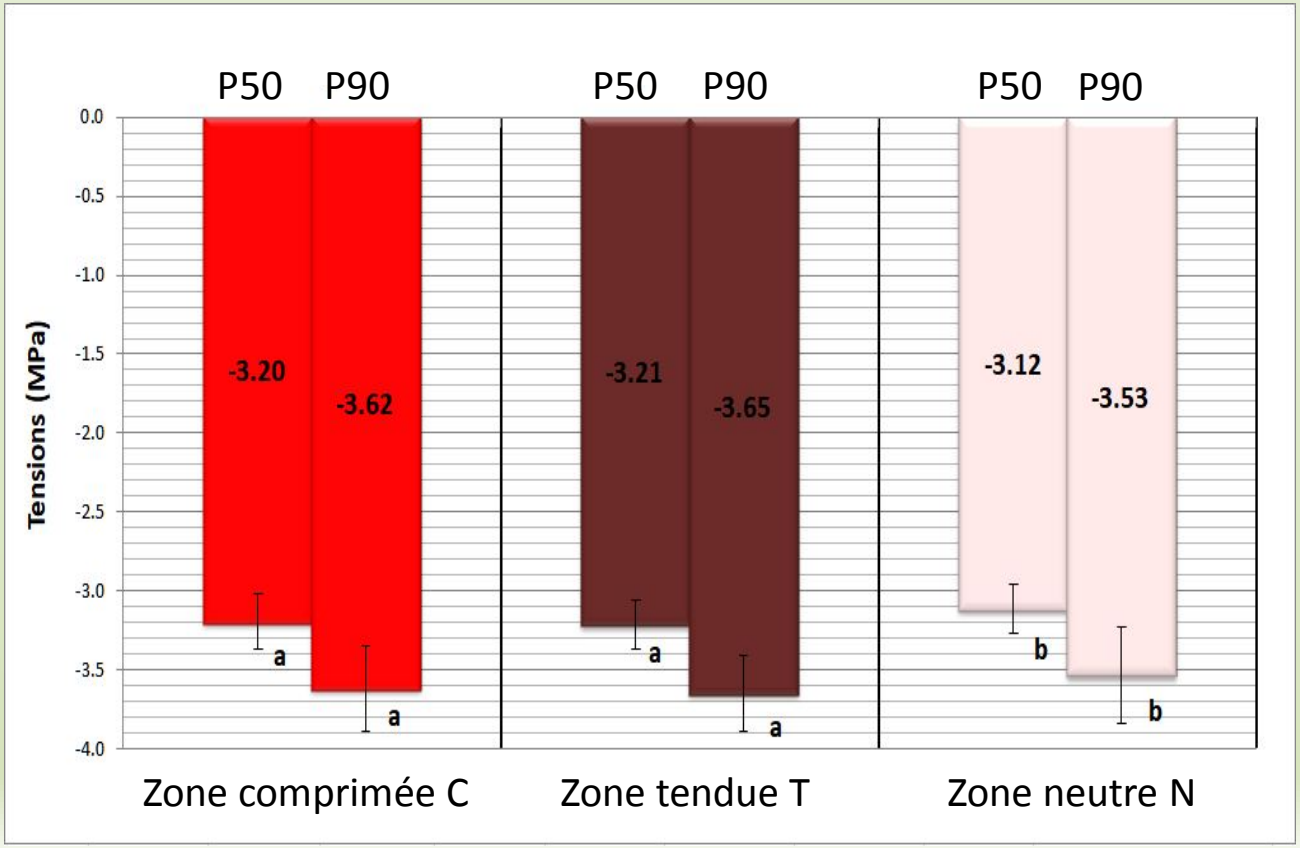


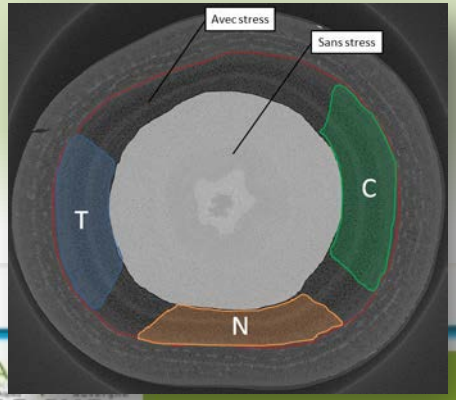
Résultats intra-échantillons

- Comparaison entre zone de bois (comprimée, tendue, neutre) :

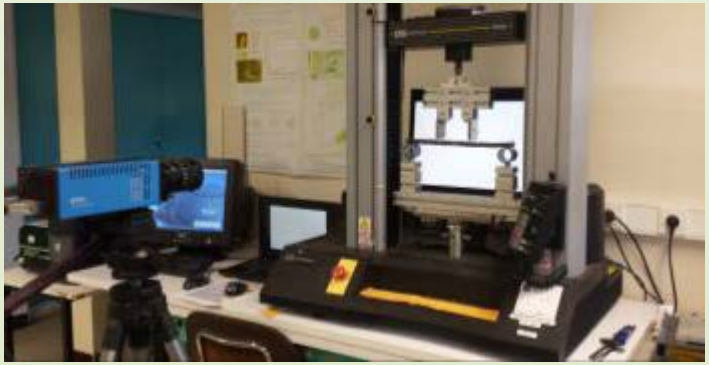
- **Résistance** à la cavitation **accrue** dans les zones **comprimée** et **tendue** (environ 3%)

- Résultats obtenus uniquement sur les plants **bien irrigués**





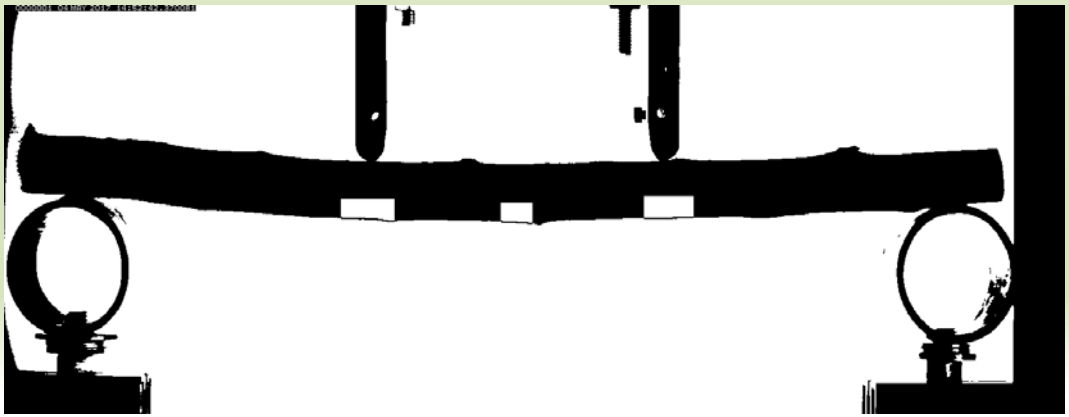
Propriétés élastiques : outil



- **Essai de flexion 3 ou 4 points :**
  - Instron 5565
  - <u>Données acquises :</u>
    - Force
    - Déplacement traverse (vérifié par analyse d'image du suivi vidéo)
    - Moment quadratique I obtenu par analyse d'image de la section à mi-travée

$$I \propto d_{sens\ neutre} * d_{sens\ flexion}{}^{3}$$

  - <u>Résultats obtenus :</u>
    - Contrainte maximale
    - Déformation maximale
    - **<u>Rigidité de flexion EI</u>**

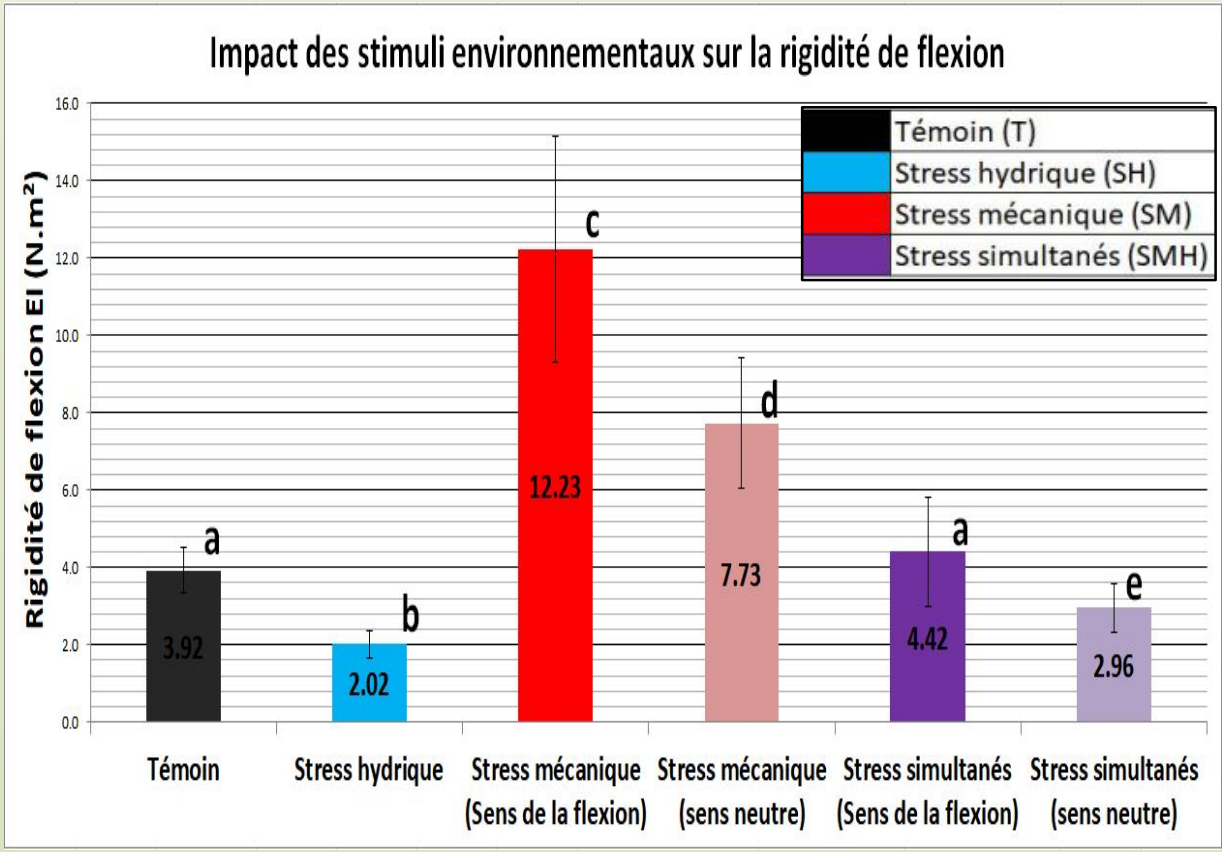


=> Sur bois vert

Stress mécanique **asymétrique**
- Impact sur EI -

- **Impact positif** du stress **mécanique** :
  - EI multipliée par 2 et par 3 par rapport aux Témoins

- **Impact négatif** du stress **hydrique** :
  - EI divisée par 2 et 3 par rapport à leur témoin

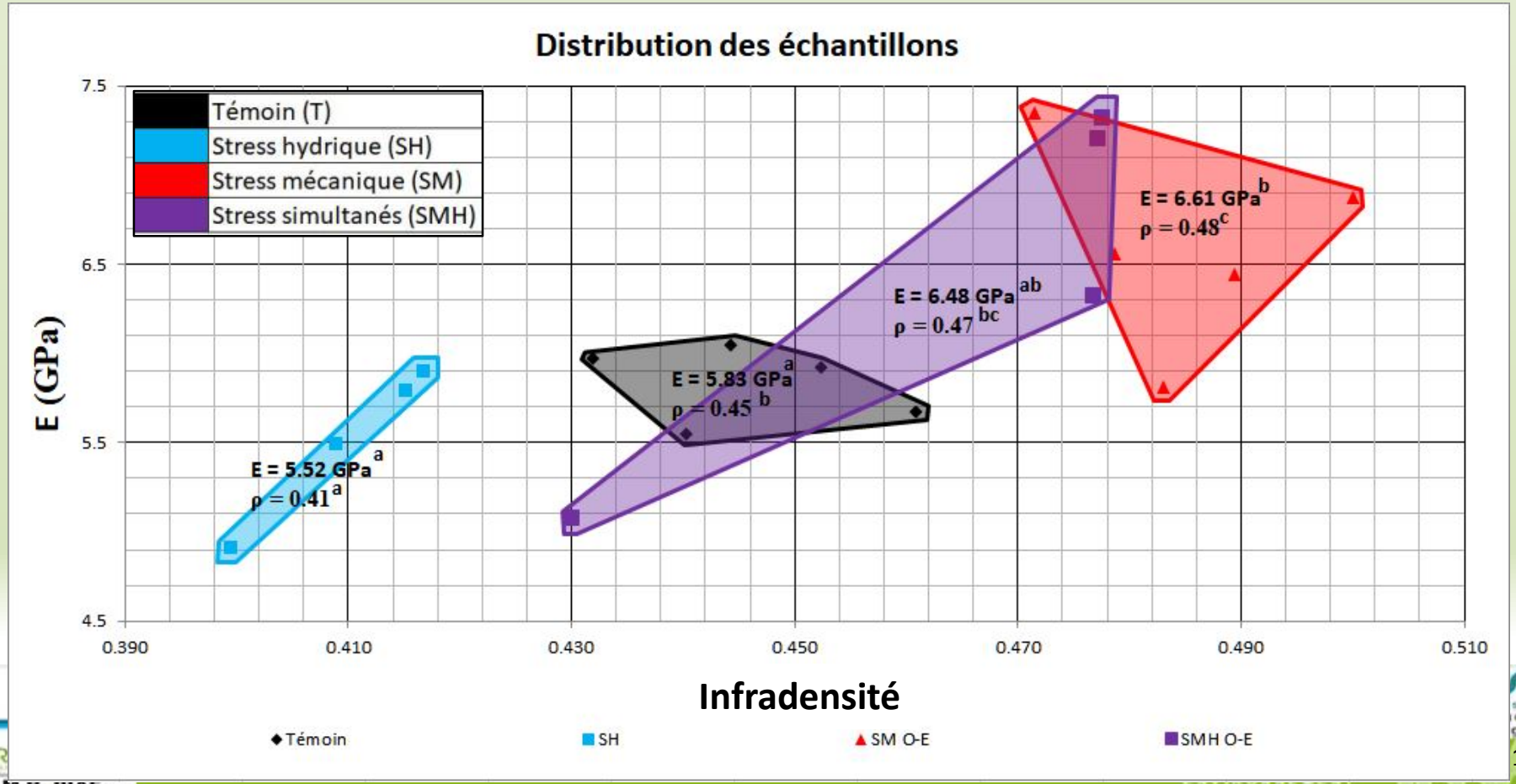


➢ **Bénéfice adaptatif** de l'acclimatation à un stress **mécanique**

Stress mécanique **asymétrique**

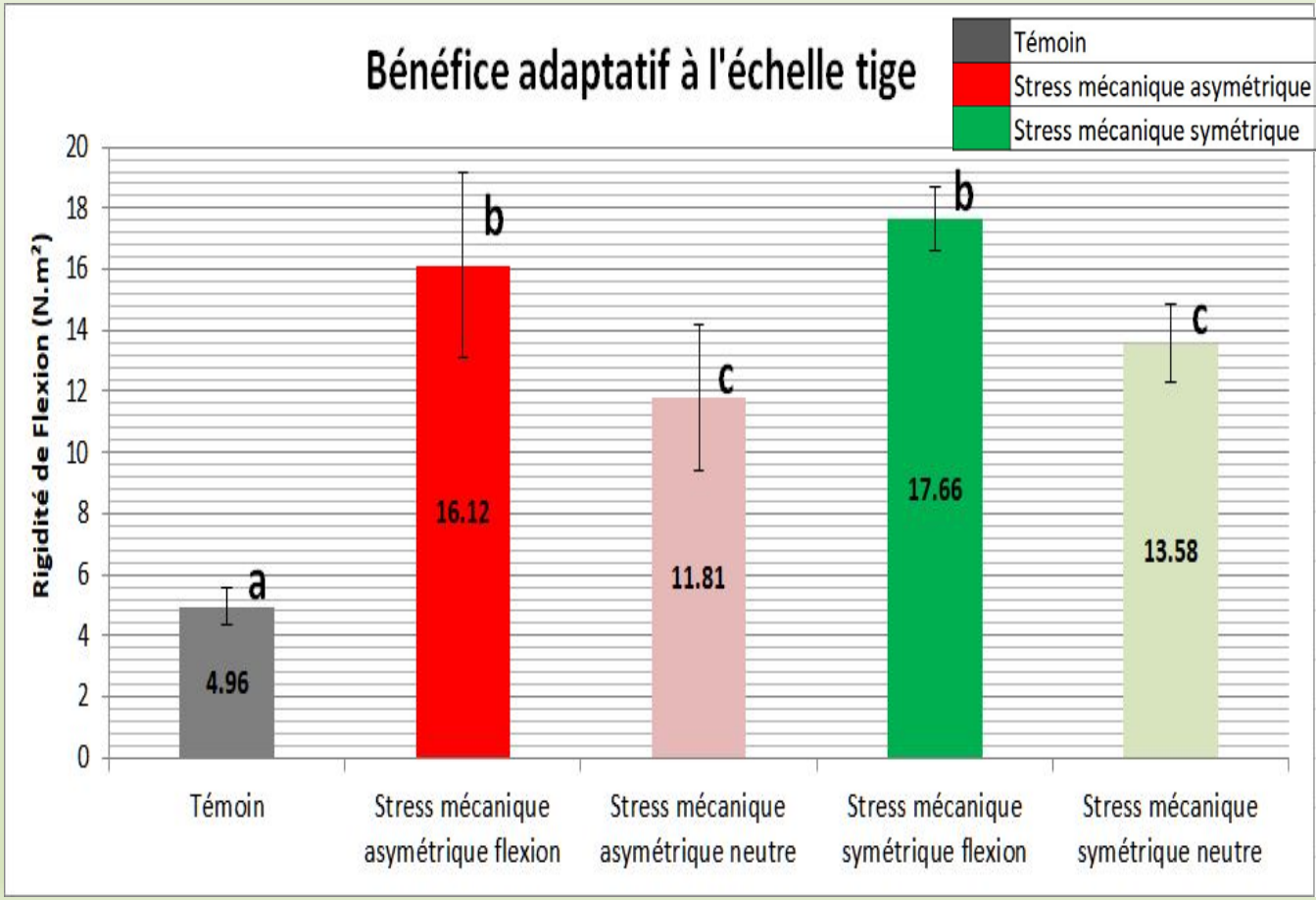
- Impact sur le module d'élasticité et l'infradensité -

- Stress **mécanique** :
  - **Impact positif** sur le **module d'élasticité et l'infradensité** pour les plants **bien irrigués**
  - **Impact positif** sur **l'infradensité** pour les plants sous **stress hydrique**



Stress mécanique **symétrique**
- Impact sur EI -

- **Stress mécaniques :**
  - **Asymétrique** : EI multipliée par **3.3** par rapport aux témoins
  - **Symétrique** : EI multipliée par **3.6** par rapport aux témoins

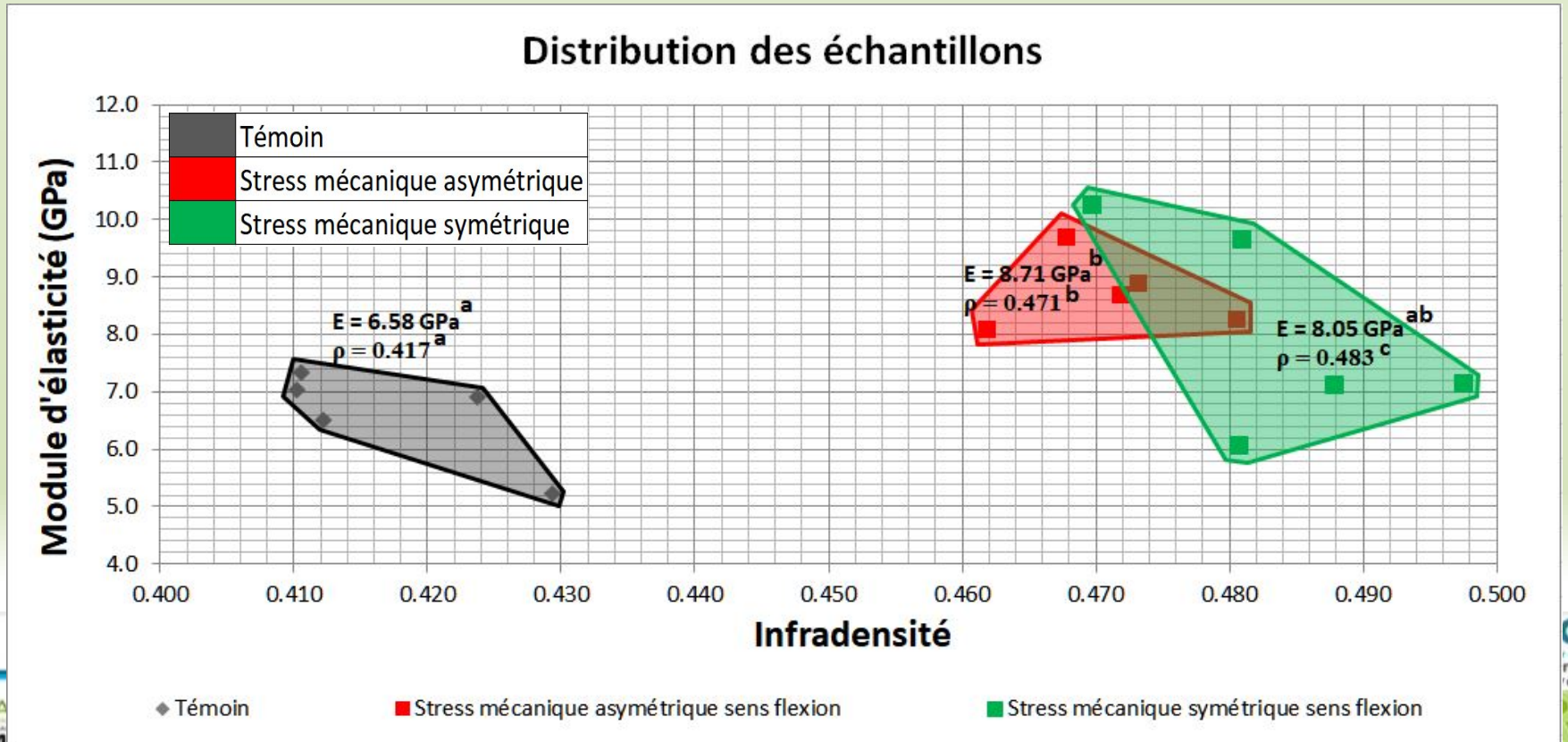


➢ **Aucun impact** de la **symétrie** des sollicitations mécaniques sur la **rigidité de flexion**

Stress mécanique **symétrique**

- Impact sur le module d'élasticité et l'infradensité -

- <u>Stress mécanique **asymétrique** :</u>
  - **Augmentation** de l'**infradensité** et du **module d'élasticité** (respectivement 13% et 26%)
- <u>Stress mécanique **symétrique** :</u>
  - **Augmentation** de l'**infradensité** (16%)
  - **Aucun impact** significatif sur le **module d'élasticité**



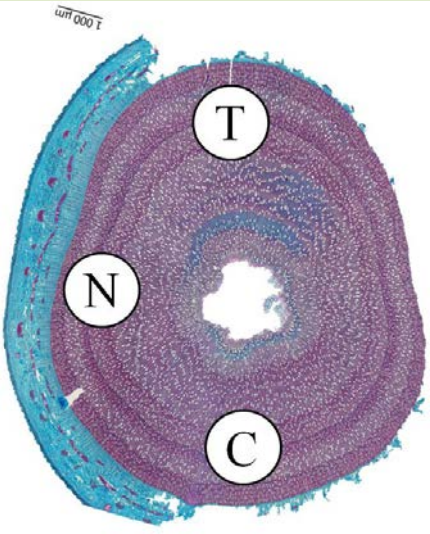
Conclusions

- **<u>Croissance sous stress mécanique :</u>**
  - **Forte croissance secondaire** dans le **sens des sollicitations**
  - La **thigmomorphogénèse** n'est **pas affectée** par **l'état hydrique** des plants
  - La **biomasse totale augmente**

- **<u>Modulation des propriétés par les sollicitations mécaniques :</u>**
  - Pour les plants **bien irrigués**, **gain en résistance à la cavitation** du bois dans les **zones soumises à des déformations**
  - **Quel que soit l'état hydrique** des plants, la **rigidité de flexion** et l'**infradensité** sont **fortement augmentées**

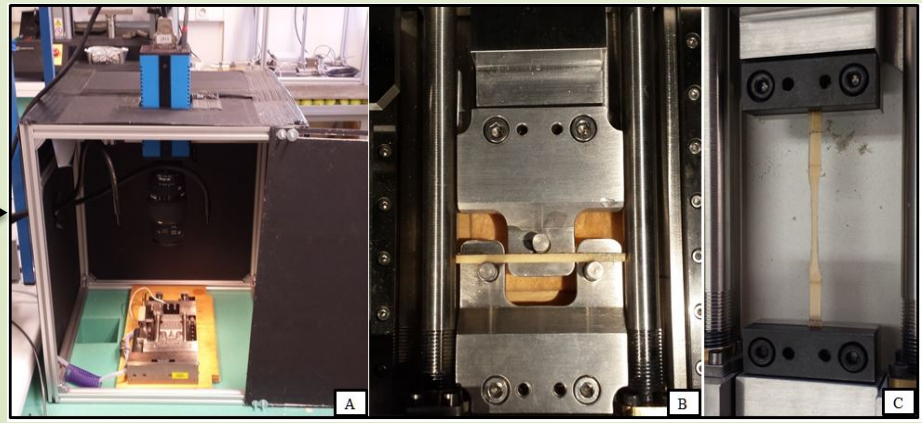
Perspectives

- Comportement mécanique global de la tige (rupture)
- Caractérisation de l'impact des stress abiotiques sur les **propriétés locales** du bois formé dans les trois zones d'intérêt : zone en compression, zone en tension et zone neutre

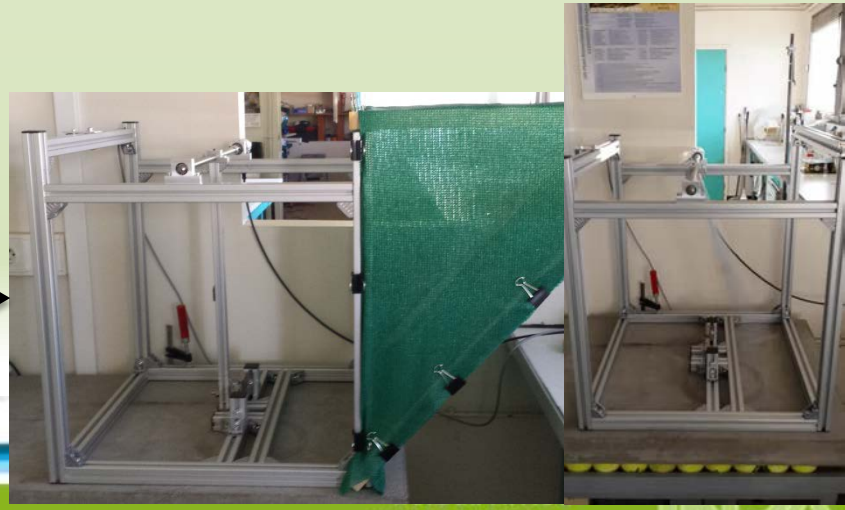


Allumettes 2x2x50mm

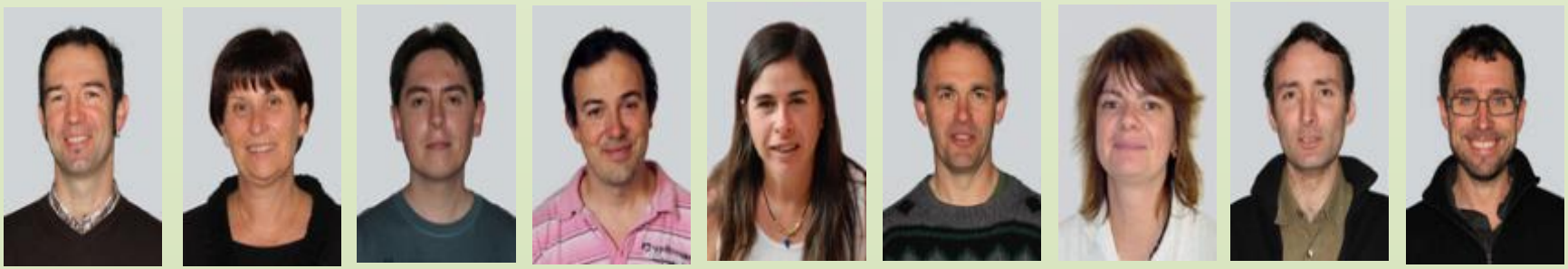
Micro-flexion 3 points

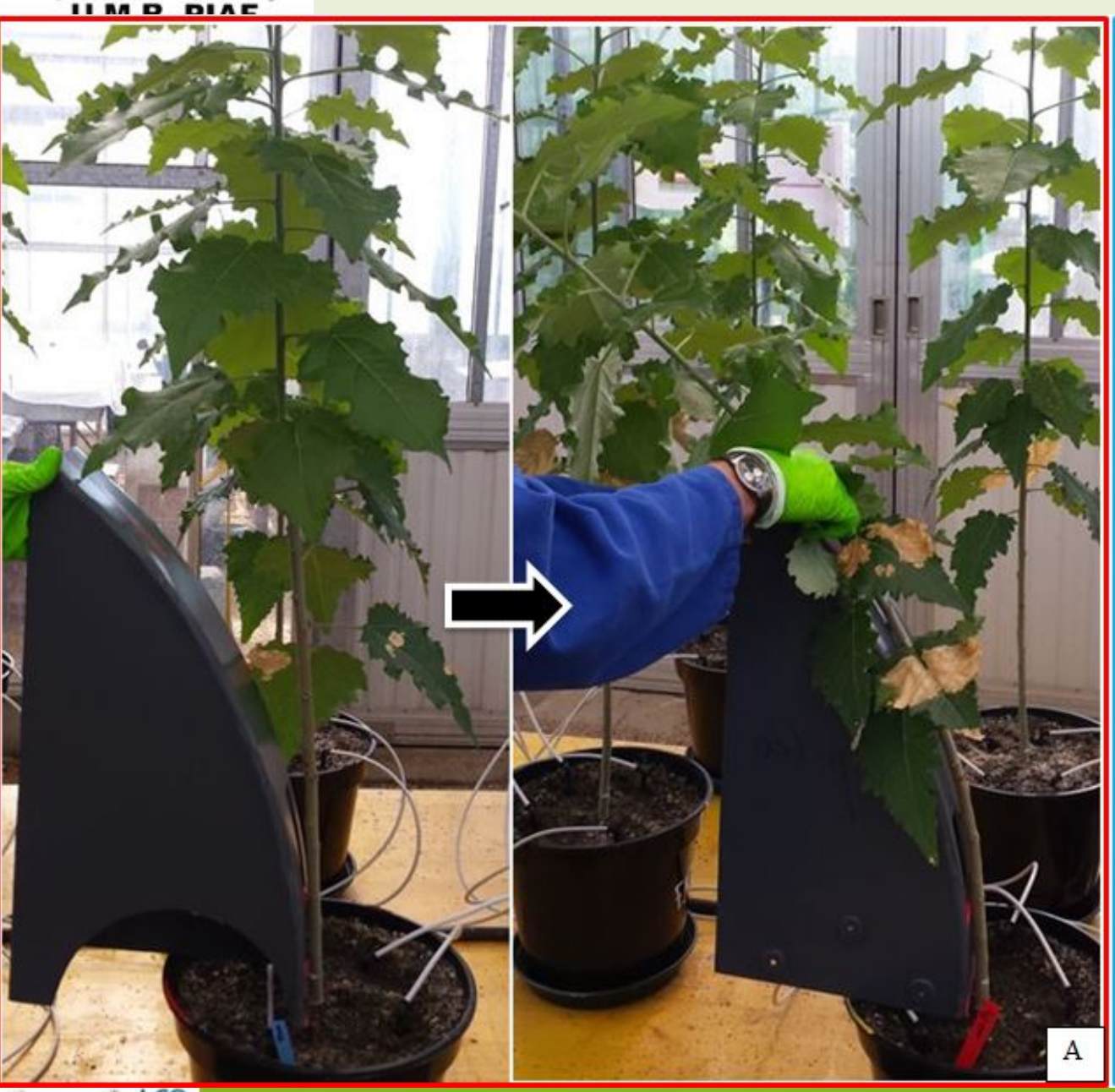


Essai résilience au choc



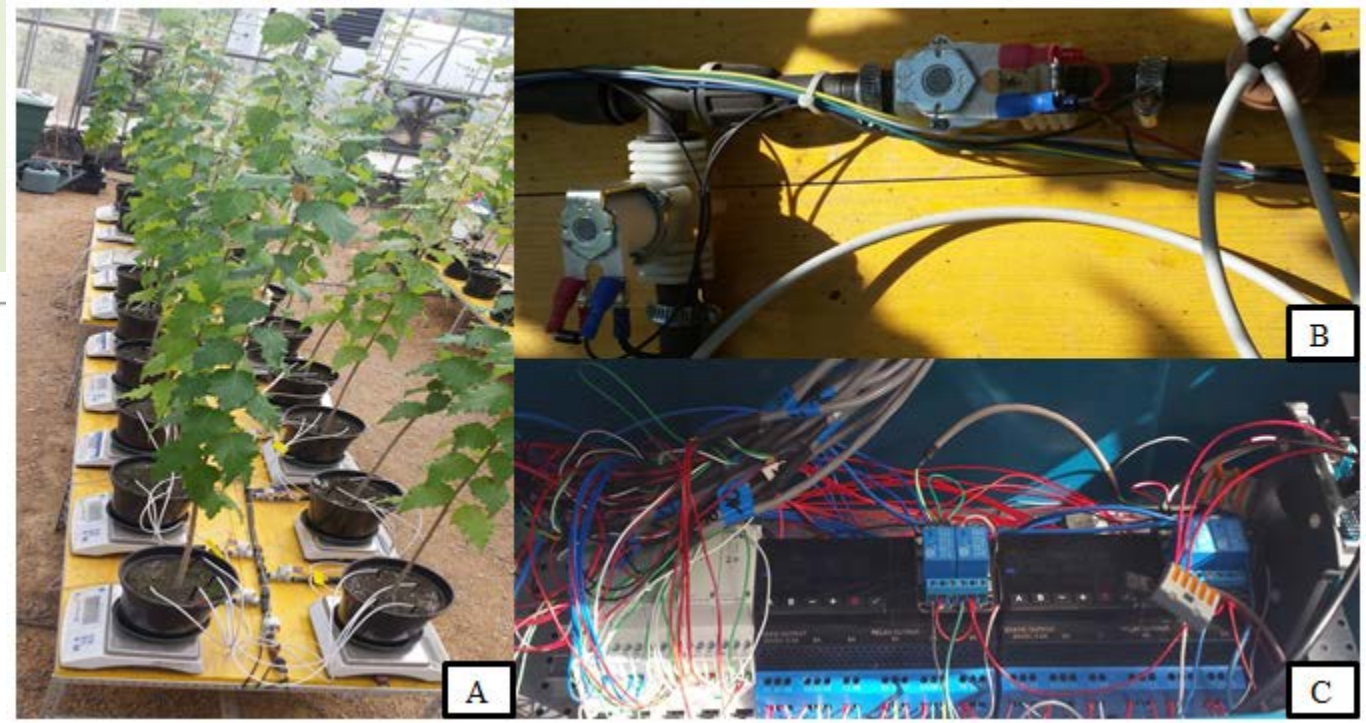
Merci de votre attention

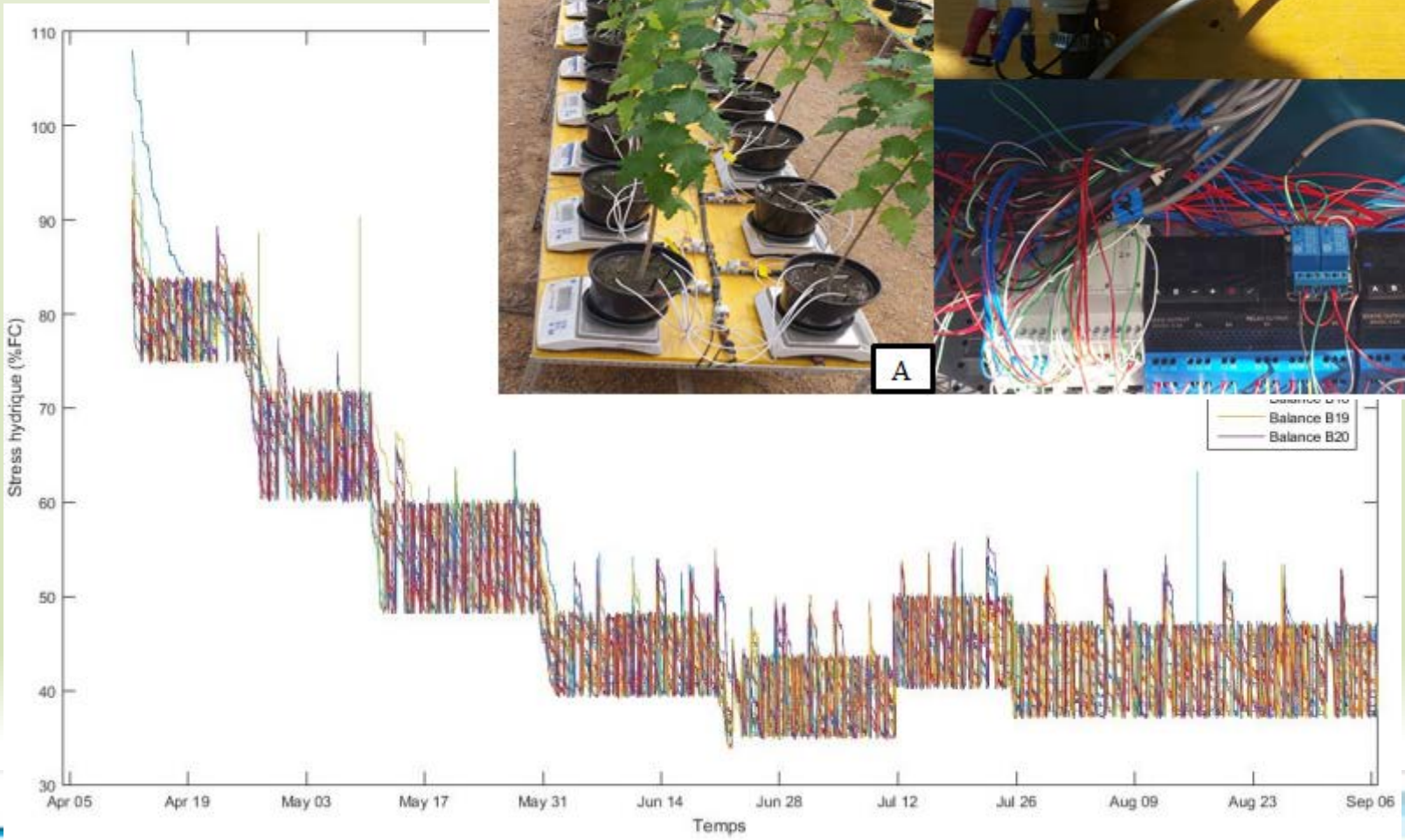



A

B

SH5
10
PCE-TB Series
7084.5 g
PCE

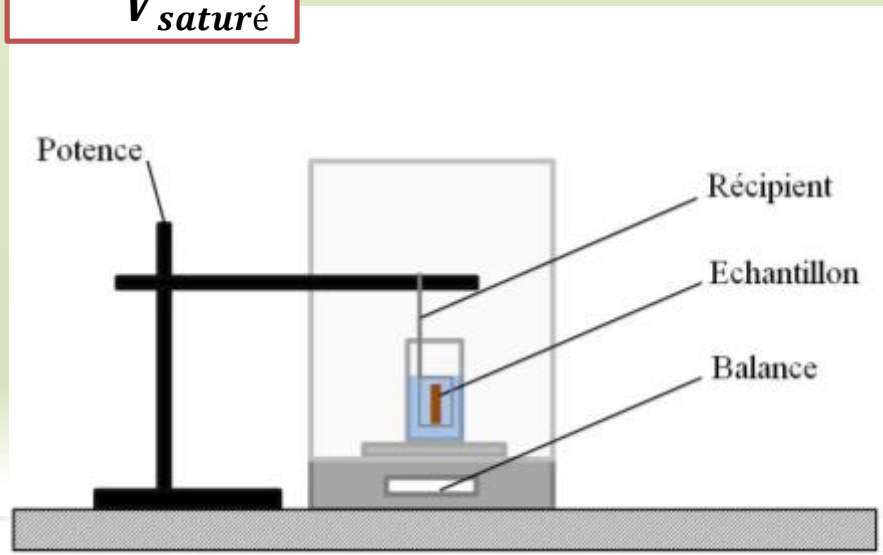

A
B
C

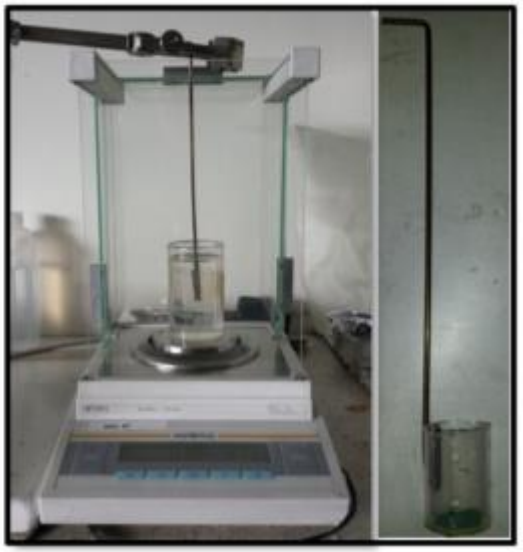

Stress hydrique (%FC)
110
100
90
80
70
60
50
40
30
Apr 05
Apr 19
May 03
May 17
May 31
Jun 14
Jun 28
Jul 12
Jul 26
Aug 09
Aug 23
Sep 06
Temps
Balance B19
Balance B20

Mesure locale de l'infradensité

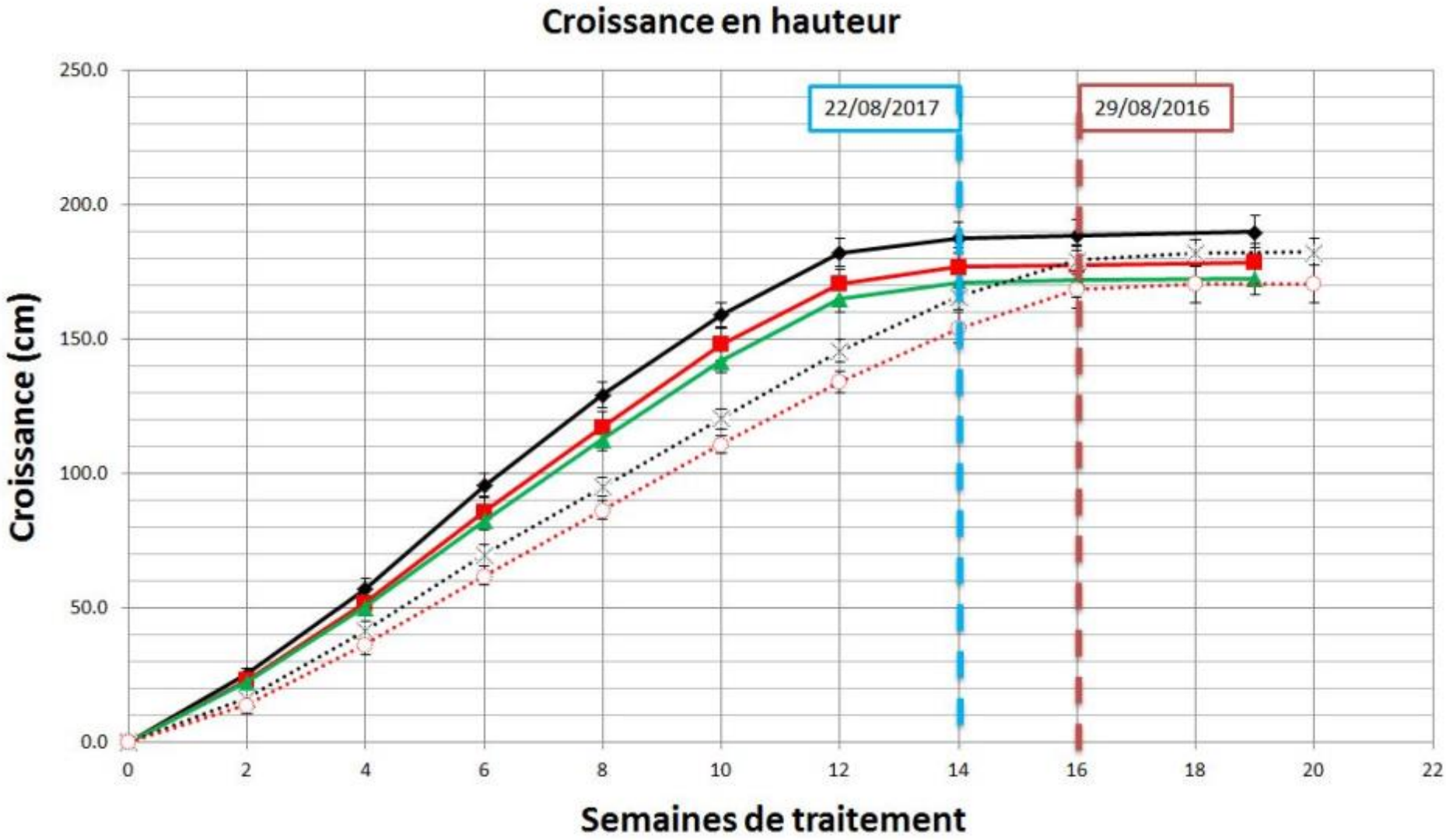
- **Objectifs :**
  - Caractériser la modulation de l'infradensité par l'application de stimuli contrôlés

- **Matériel et Méthode :**
  - Mesure masse d'eau déplacée => Volume saturé de l'échantillon
  - Echantillon à l'étuve à 104°C pendant 24h
  - Mesure masse sèche
  - Infradensité : $\boldsymbol{\rho = \frac{m_{sèche}}{V_{saturé}}}$

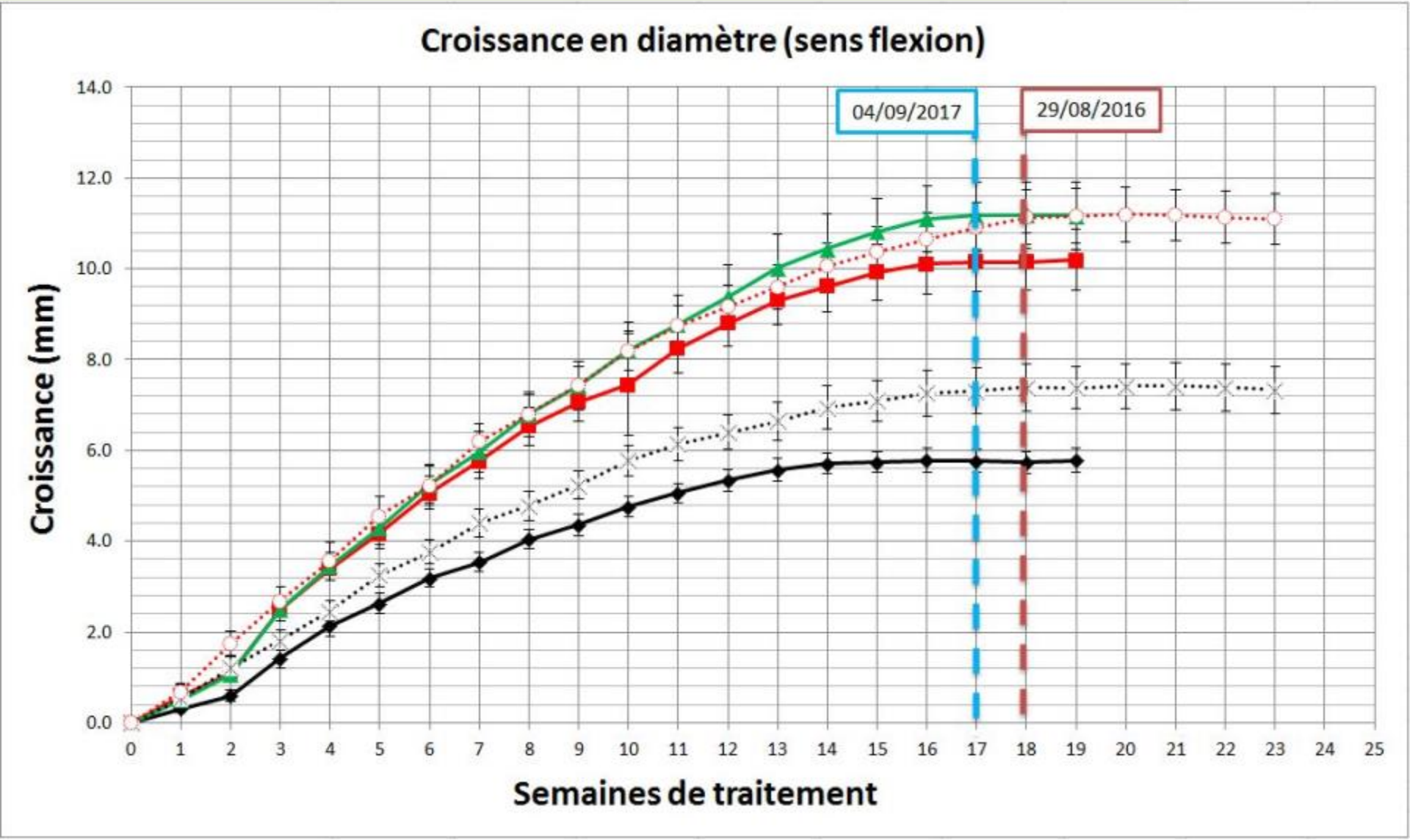




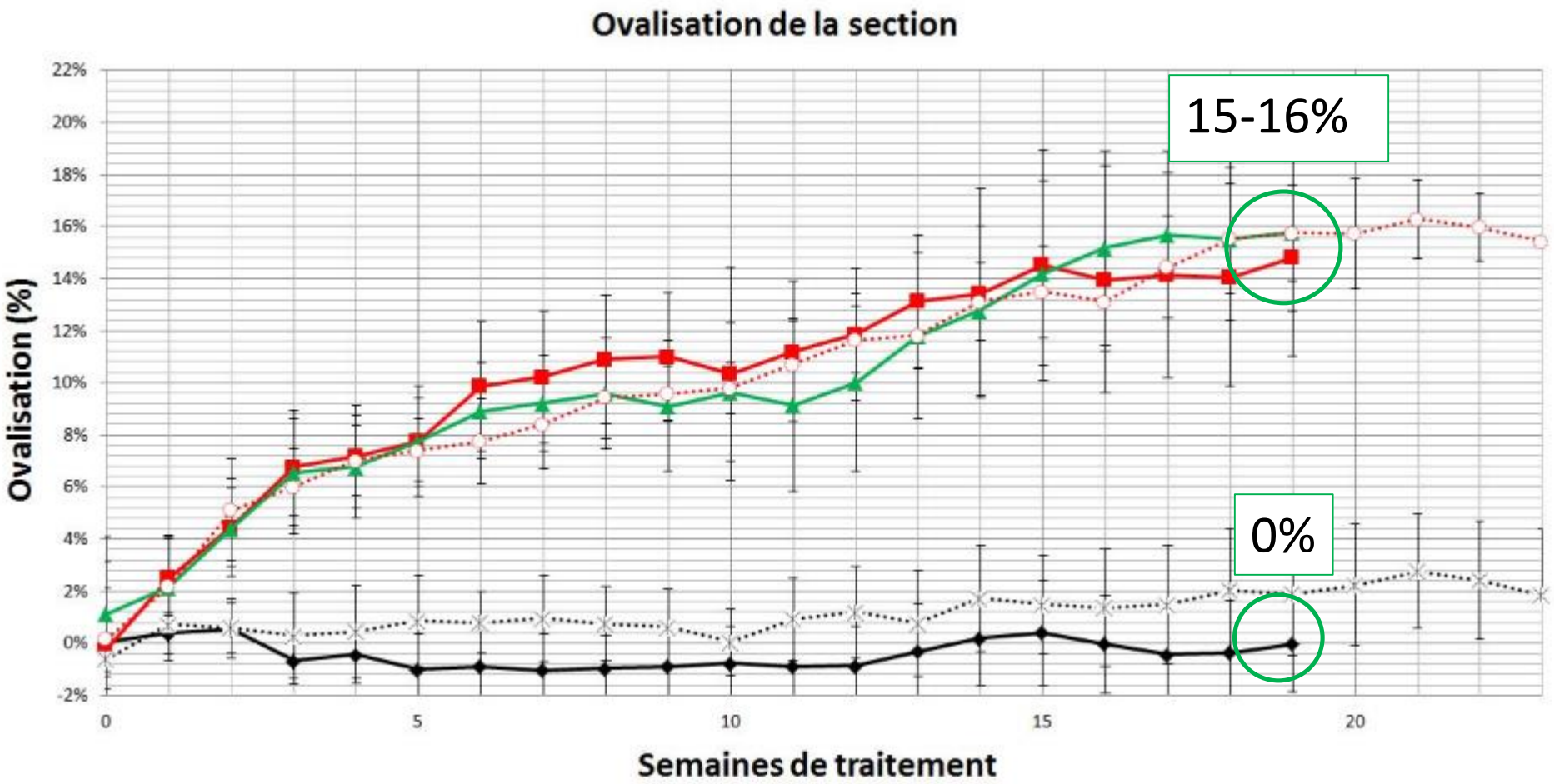
2017

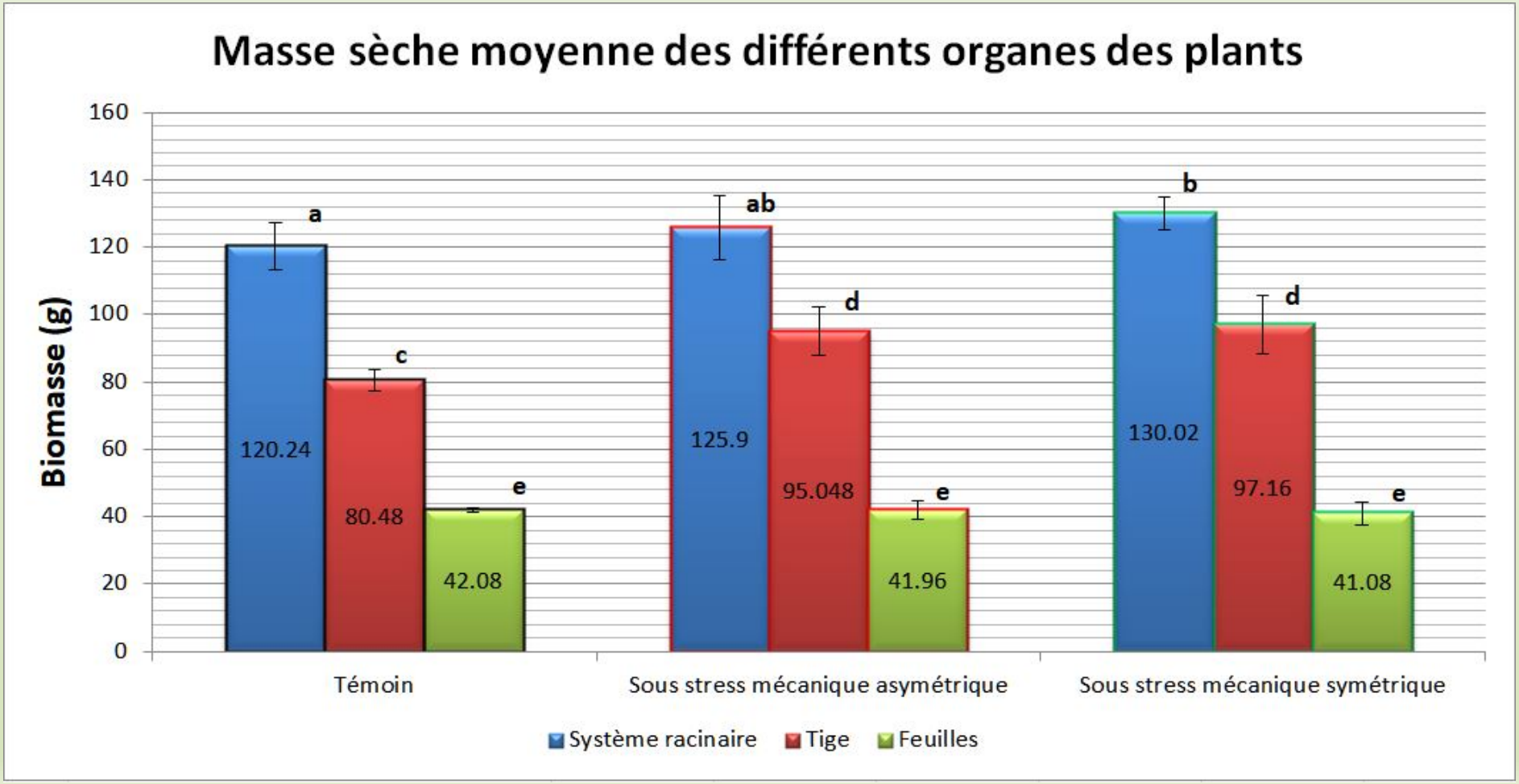

Croissance en hauteur
22/08/2017
29/08/2016
Croissance (cm)
250.0
200.0
150.0
100.0
50.0
0.0
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
Semaines de traitement

2017


Croissance en diamètre (sens flexion)
04/09/2017
29/08/2016
Croissance (mm)
14.0
12.0
10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
0.0
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25
Semaines de traitement

2017


Ovalisation de la section
Ovalisation (%)
22%
20%
18%
16%
14%
12%
10%
8%
6%
4%
2%
0%
-2%
0
5
10
15
20
Semaines de traitement
15-16%
0%


Masse sèche moyenne des différents organes des plants
Biomasse (g)
160
140
120
100
80
60
40
20
0
a
c
e
ab
d
e
b
d
e
120.24
80.48
42.08
125.9
95.048
41.96
130.02
97.16
41.08
Témoin
Sous stress mécanique asymétrique
Sous stress mécanique symétrique
Système racinaire
Tige
Feuilles