

# La sécurité mécanique des arbres urbain bases biomécaniques pour l'aménagement et la gestion



**Oloron-Sainte-Marie : de violents coups de vent couchent plusieurs arbres 28/06/2017**



**SUD OUEST**

Concarneau . L'arbre de la cour d'école malmené par le vent : une grosse branche au sol !



**Le Télégramme**



07/03/2017

**LA MONTAGNE**

**Tempête Zeus : l'arbre déraciné menaçait une habitation à Massiac (Cantal)**





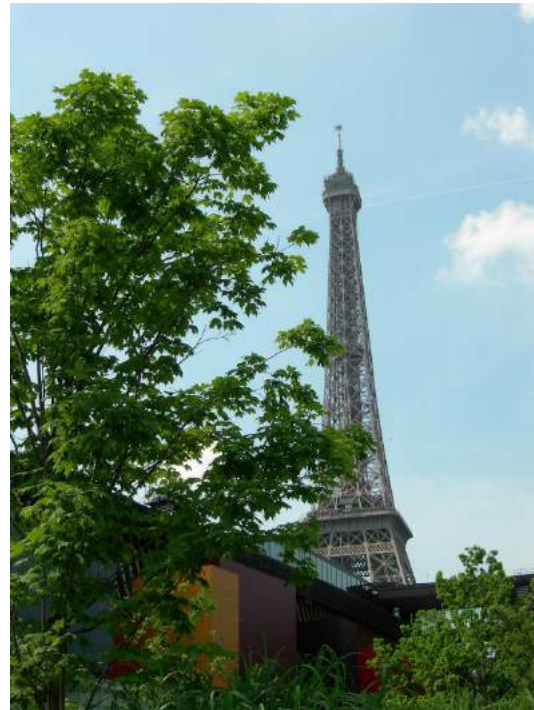
# Native trees brave cyclone Vardha, stand tall | Special report

# Pour ne pas prendre de risques



On se prive de  
**Services (ombrage , climatisation, esthétique paysagère)**

## Génie civil



## Génie végétal



D'autant plus important que le  
**Changement Climatique = plus de tempêtes**

Comment en arriver là ?

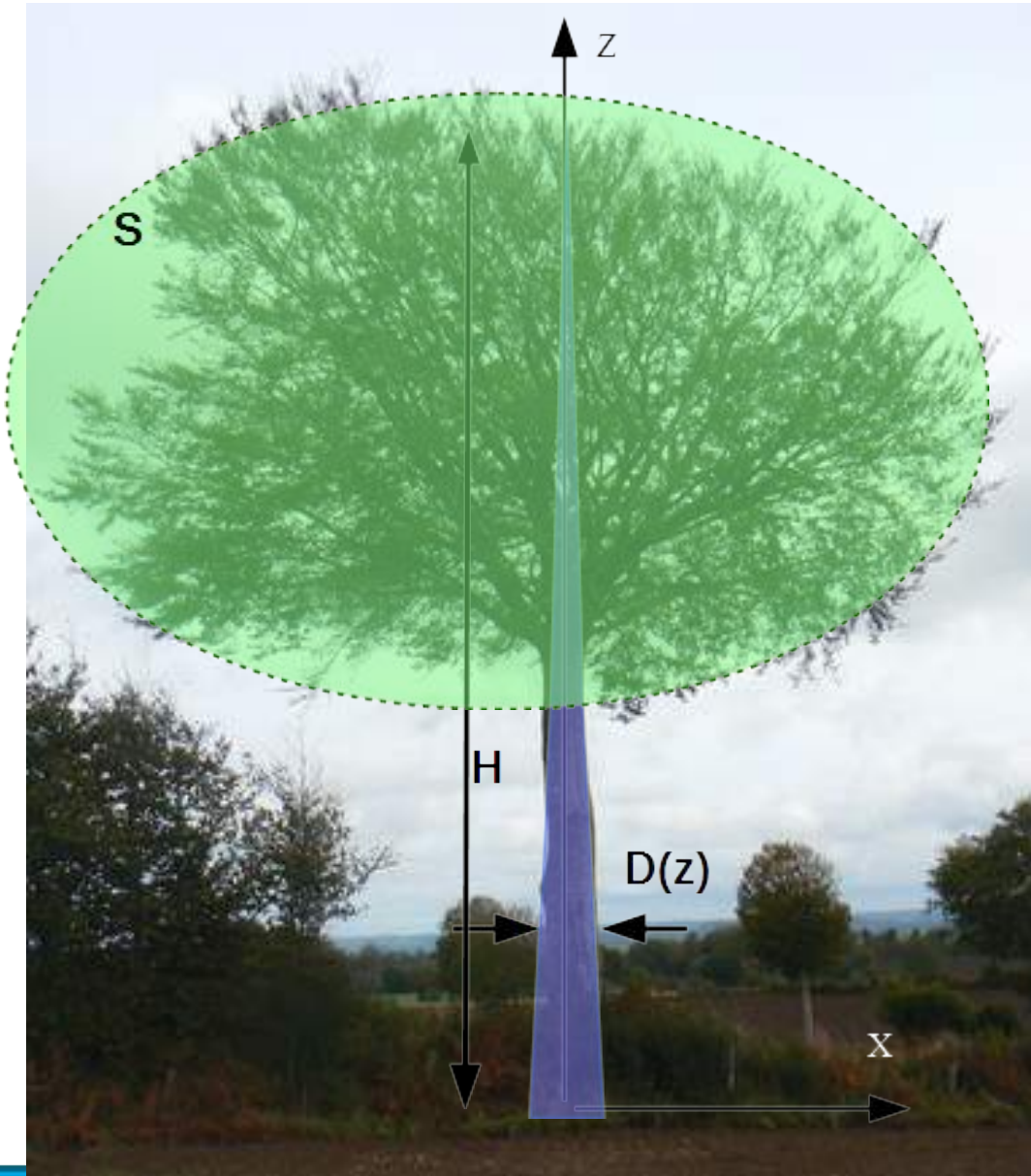
**Comment comprendre et diagnostiquer  
la sécurité mécanique des arbres ?**

**Que nous dit la science ?**

**Comment aménager avec des arbres puis  
les gérer pour obtenir des arbres robustes ?**

# Le vent et les contraintes mécaniques : l'apport de la (bio-)mécanique

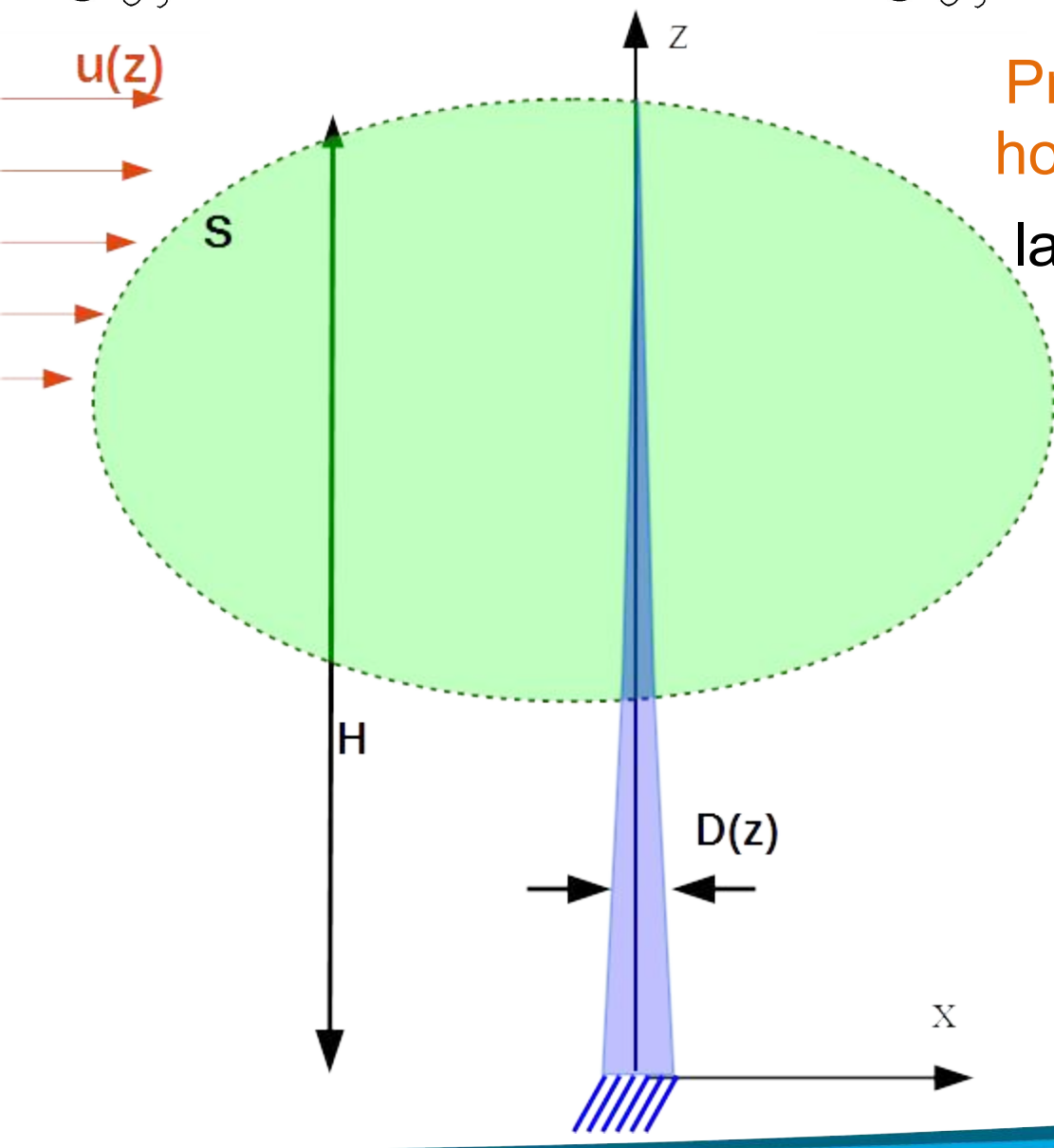
U.M.R. PIAF



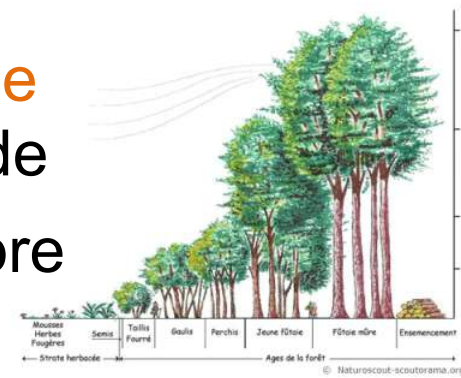
Comprendre / Maitriser => Modélisation biomécanique

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT



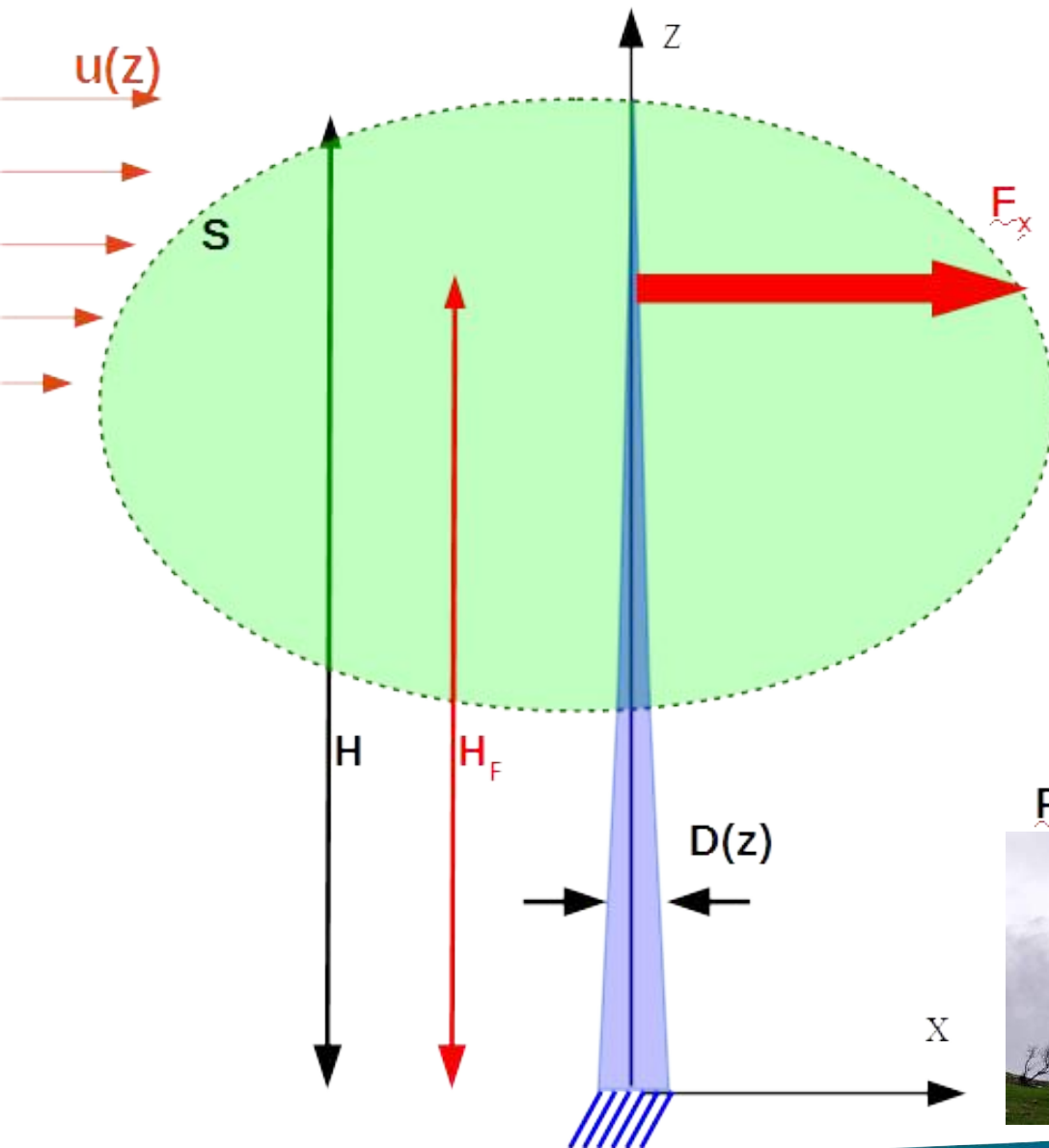


Profil de vent sur le houppier dépend de la **stature** de l'arbre



et de son **exposition**





## Force du vent = traînée (N)

Coefficient fonction du profil de vent et du houppier

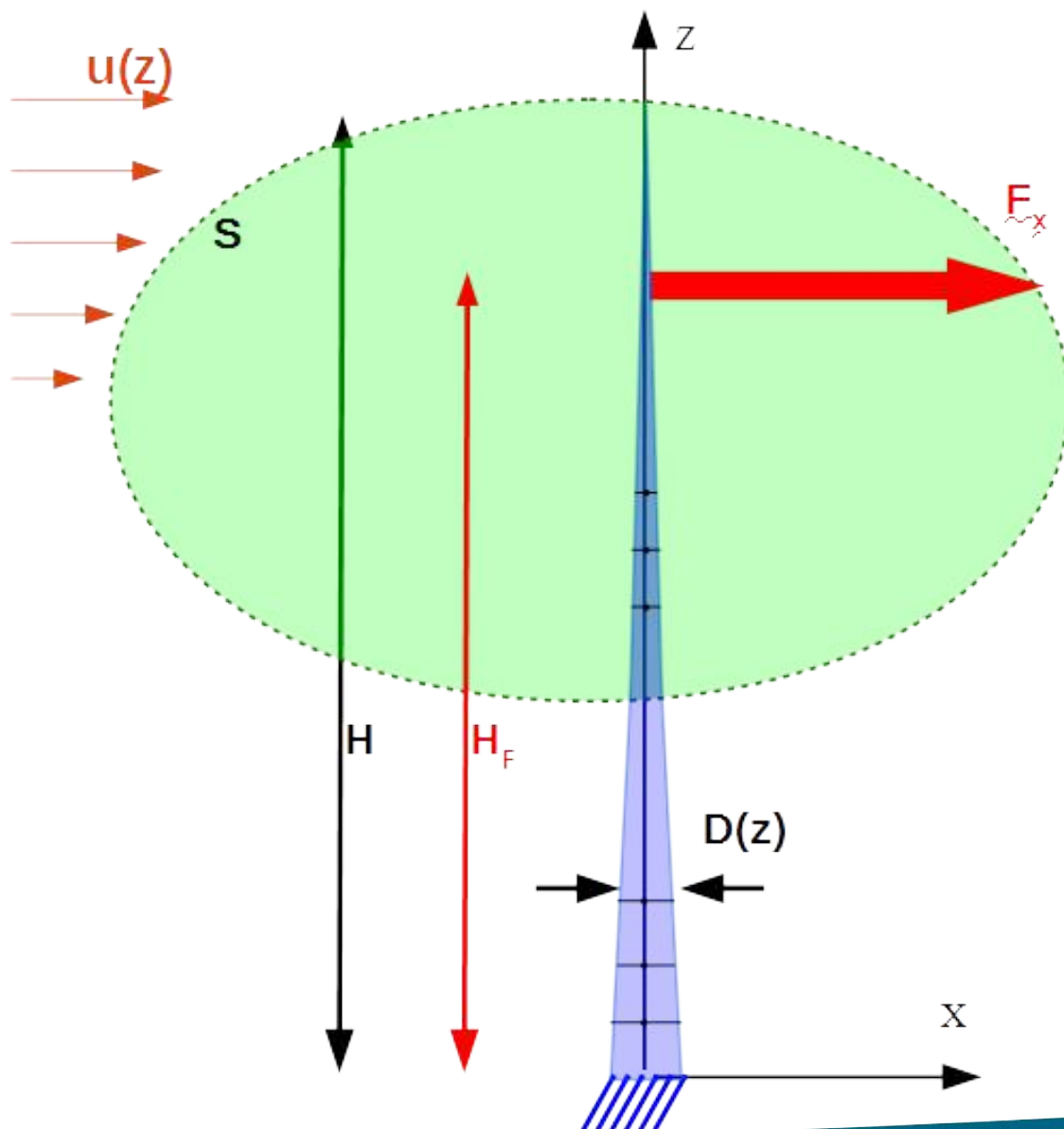
$$F_x = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \rho_{air} \cdot C_x \cdot S \cdot U_H^r$$

Coefficient de traînée (s.d)

Vitesse du vent à la hauteur H (m.s<sup>-1</sup>)

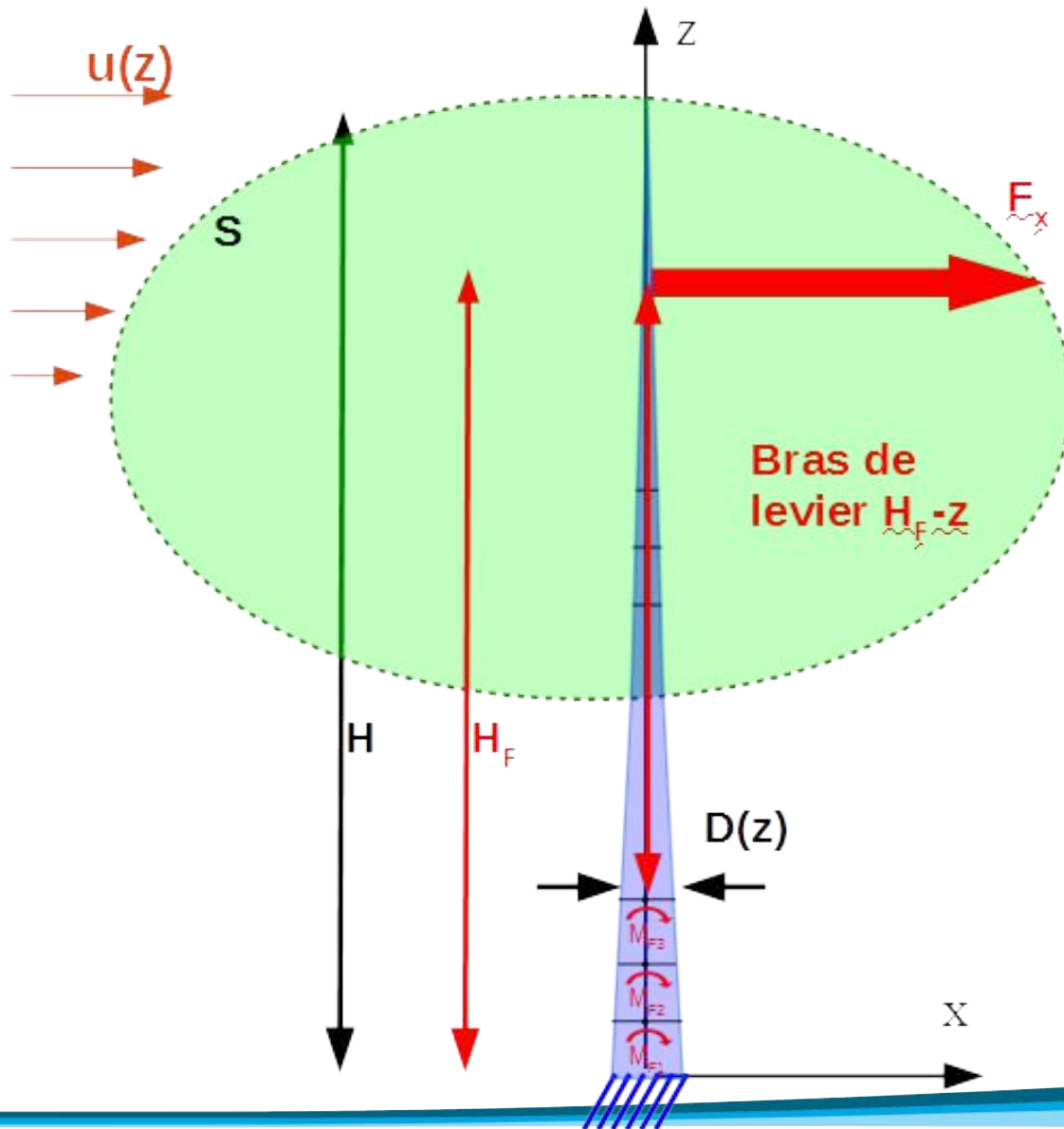
## Profilement du houppier dans le vent $r \leq 2$





Force du vent = traînée (N)

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \rho_{air} \cdot C_x \cdot S \cdot U_H^r$$

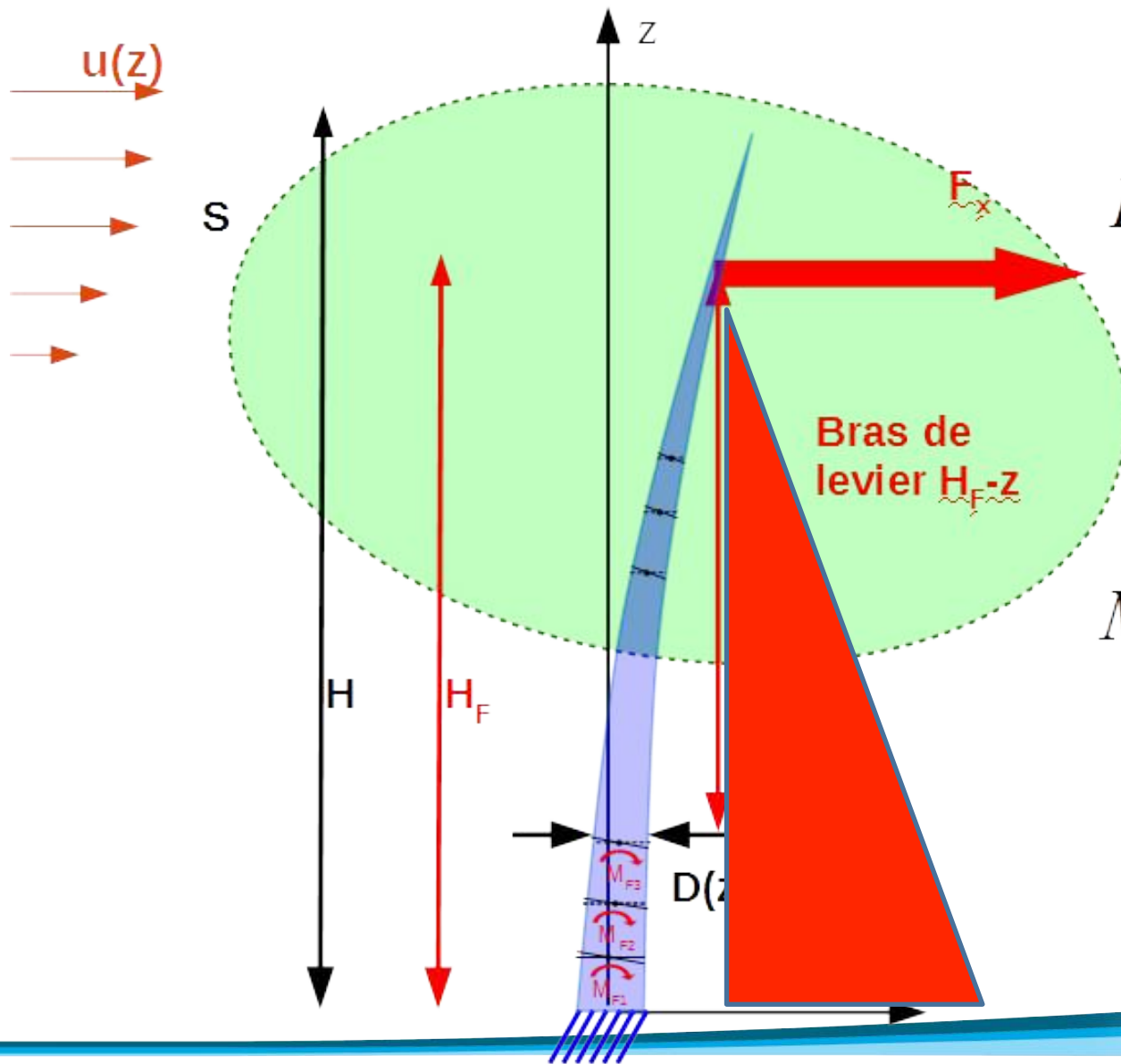


Force du vent = traînée (N)

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \rho_{air} \cdot C_x \cdot S \cdot U_H^r$$

Moment de flexion (N.m)

$$M_F(z) = F_x \times (H_F - z)$$

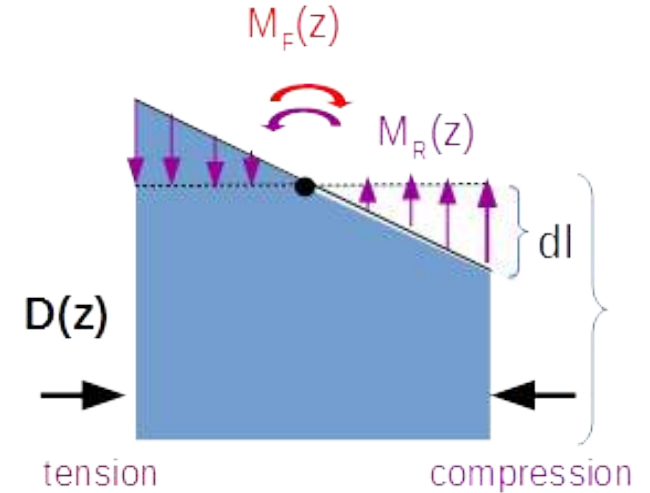
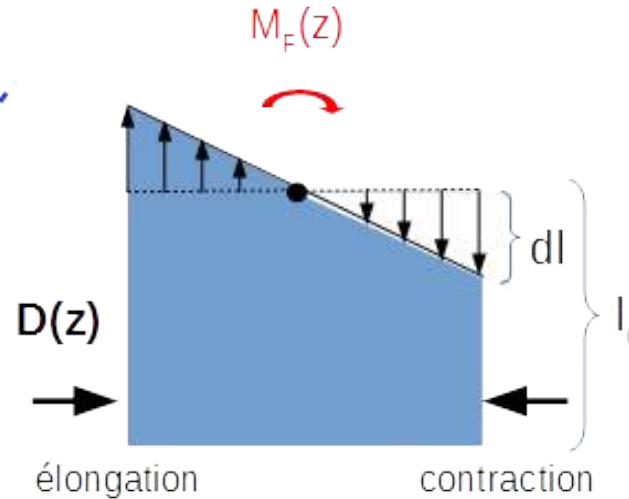
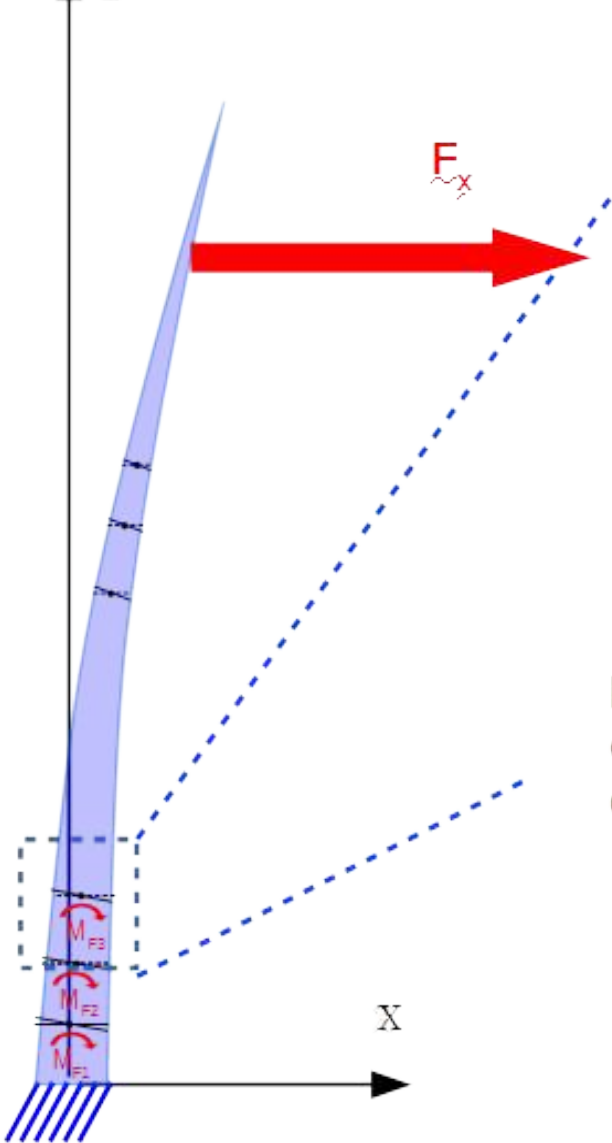


Force du vent = traînée (N)

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \rho_{air} \cdot C_x \cdot S \cdot U_H^r$$

Moment de flexion (N.m)

$$M_F(z) = F_x \times (H_F - z)$$



Déformation longitudinale  $\varepsilon$  :  
 changement relatif local des  
 dimensions ( % )

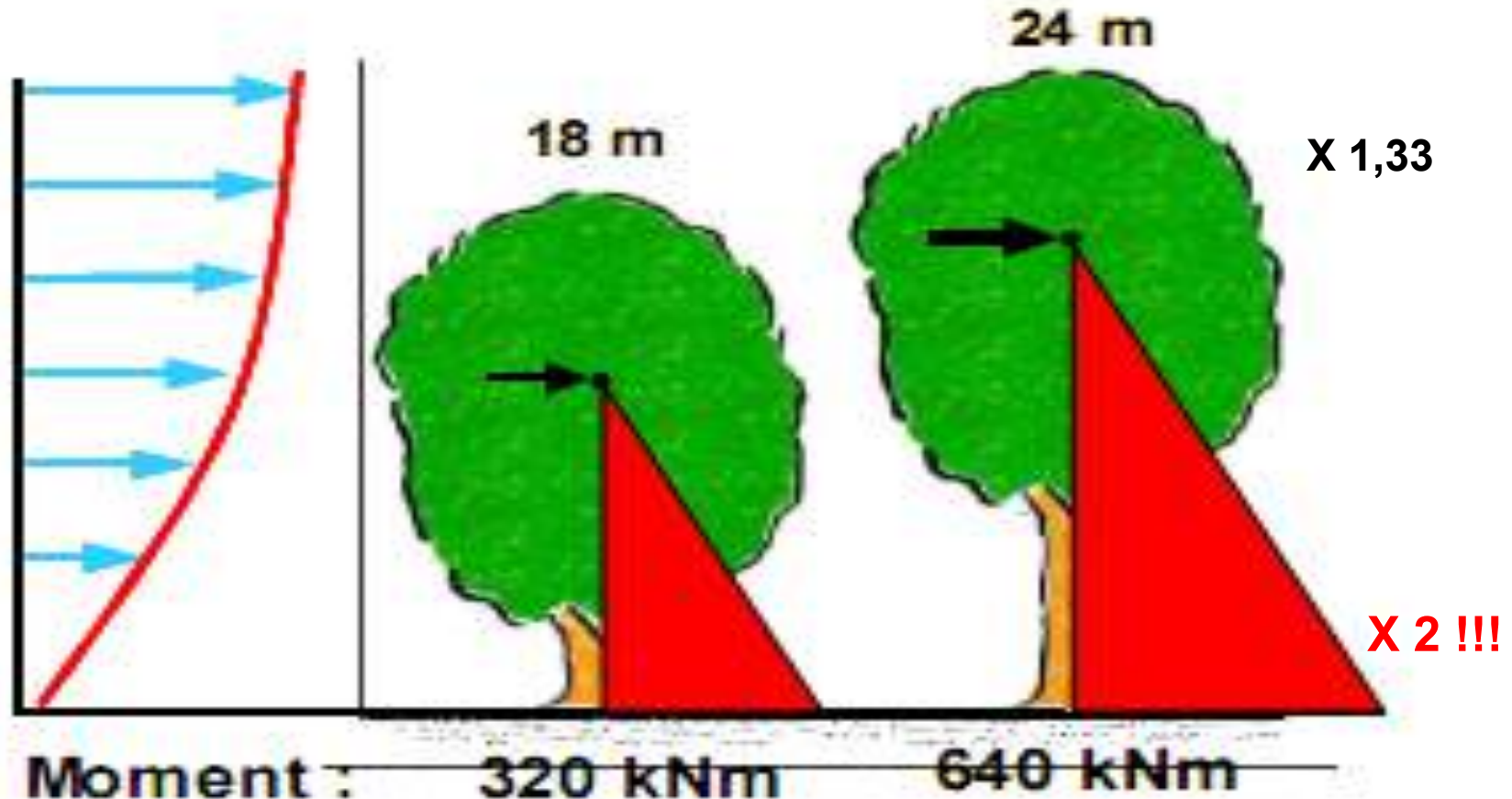
$$\varepsilon_{(z,x)} = \frac{dl}{l_0}$$

$$-\sigma_{(z,x)} = -E_{(z,x)} \cdot \varepsilon_{(z,x)}$$

Propriétés mécaniques  
 du bois :

- Module d'élasticité  $E$   
 ( $N \cdot m^{-2}$ )
- Limite de rupture en  
 déformation  $\varepsilon_{rupture}$  (%)

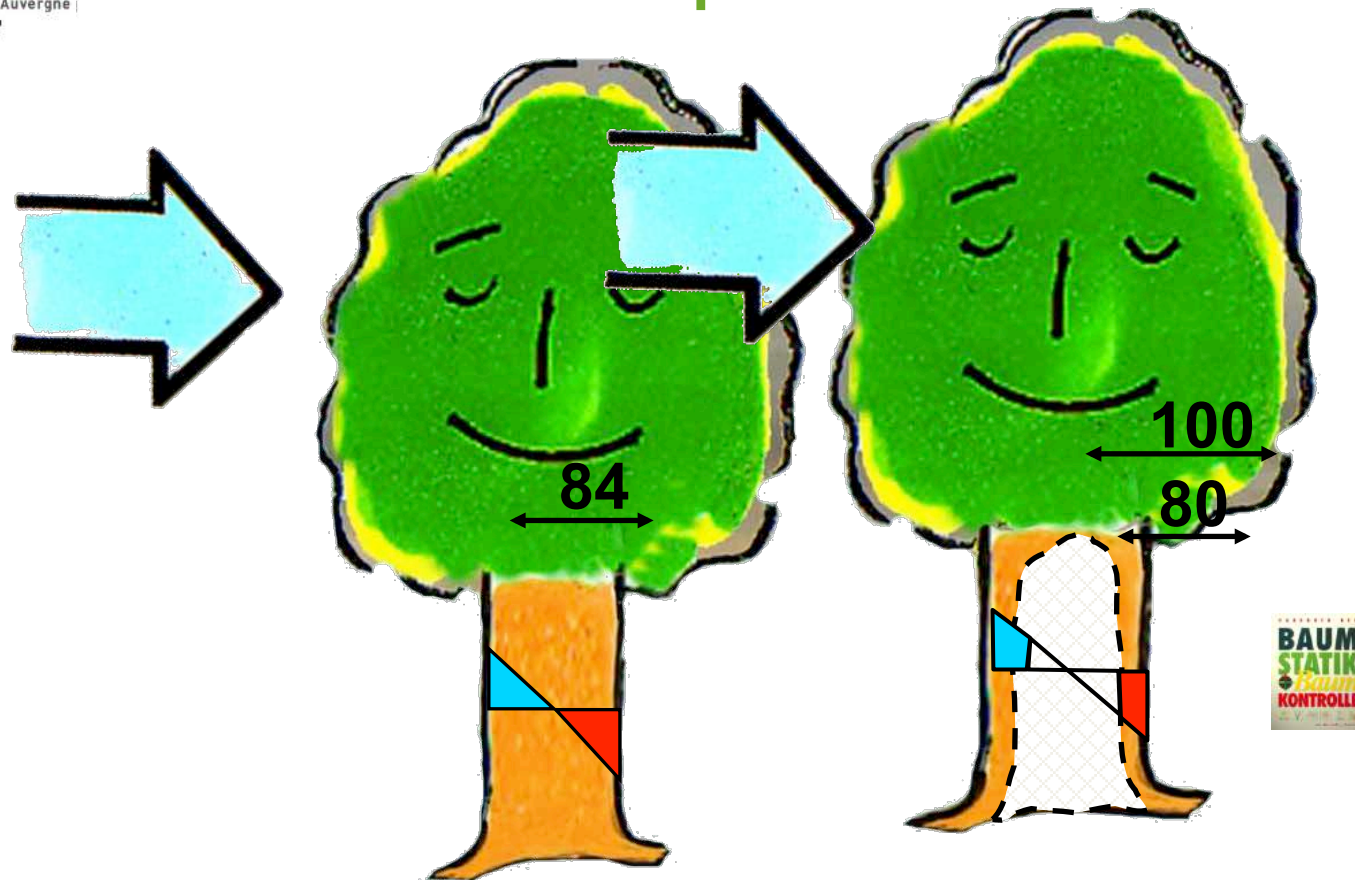
## Influence de la hauteur de l'arbre



Dellus, Lesnino Wessoly, 2004 PHM 461

Tailles de réduction – dans les cas où on doit y avoir recours – n'ont pas besoin d'être drastiques !

## Influence de la présence d'une cavité



Cavité pas forcément dangereuse  
si l'arbre peut compenser par de la croissance en diamètre  
(et si l'épaisseur de paroi ne devient pas trop fine , surtout vers le bas de l'arbre)

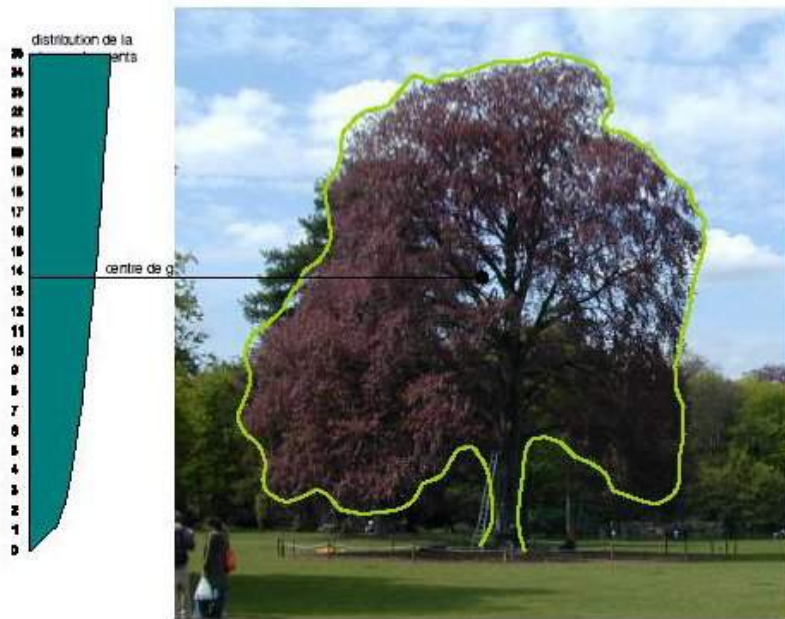


# Des outils de diagnostic de sécurité basés sur la bio-mécanique

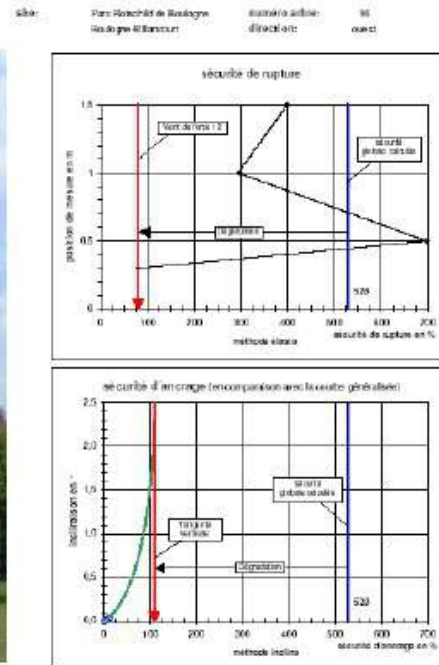
## Usage de **modèles**

## Combinaison de **test** et de **modèles**

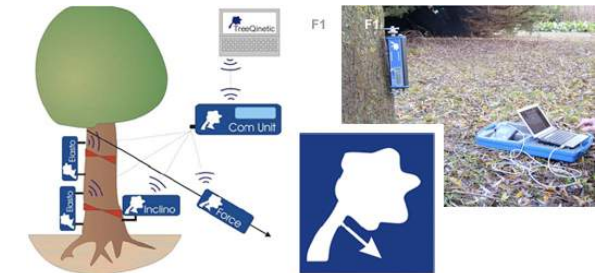
Estimation de la prise au vent et calcul du moment fléchissant et des contraintes de flexions max pour un vent de 120 Km.h-1



analyse de charge conformément à DIN 1056 + dynamique



niveau de risque en m

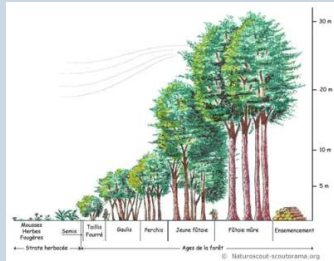


# Le point de vue de l'arbre : l'acclimatation

l'arbre et les déformations au vent : l'apport de la mécano-biologie

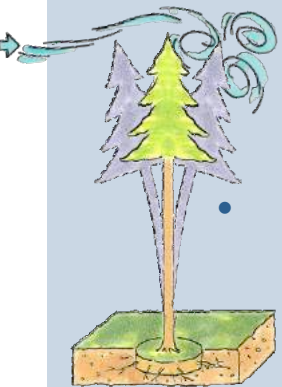


# Le double déficit mécanique de la croissance des parties aériennes /vent



- ↗ prise au vent
- ↗ bras de levier

↘ Des **moments de flexions** en trainée statique qui **s'accroissent sans cesse** (sauf si taille de réduction)



- ↗ masse , bras de levier , rigidité, ramification

↘ une **excitabilité dynamique** de l'arbre profondément modifiée par la croissance et la conduite

- S'il n'y avait pas une **acclimatation** des caractéristiques mécaniques des arbres au cours de leur développement

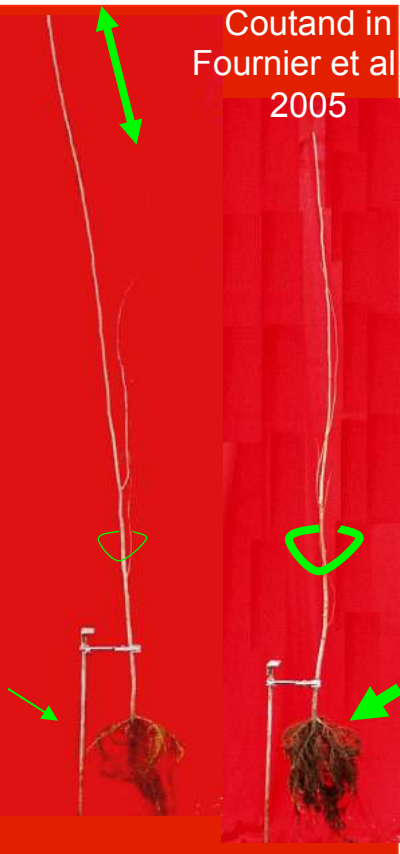
↘ **Tous les arbres casseraient au vent au cours de leur croissance**



## Les plantes **perçoivent** et **réagissent** aux **stimuli mécaniques**



# Une croissance fonction du régime de sollicitation



**Acclimatation**  
 (“adaptation physiologique”) **aux sollicitations mécaniques**

**vent \* structure**  
**(en croissance)**



## • Perception des déformations

modifie croissance D et H,

proportés du bois (bois de flexion) et ancrage racinaire

## • dans la gamme des vents courants

 **Mémoire ( 1 semaine)**

Nathalie  
 FOURNIER-  
 LEBLANC



# Et les grands arbres ?



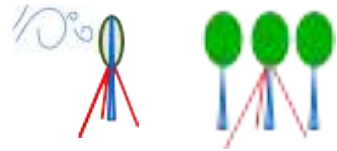
## Expérimentation sur des hêtres de 25 ans , 15m de haut

↳ mesure des déformations au vent du tronc et de sa croissance en diamètre

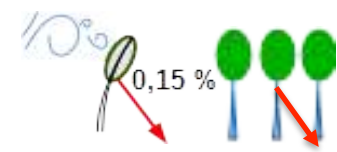
↳ 3 traitements :



• **Libres de fléchir au vent**  
(pas de déformation due au vent dans le tronc)

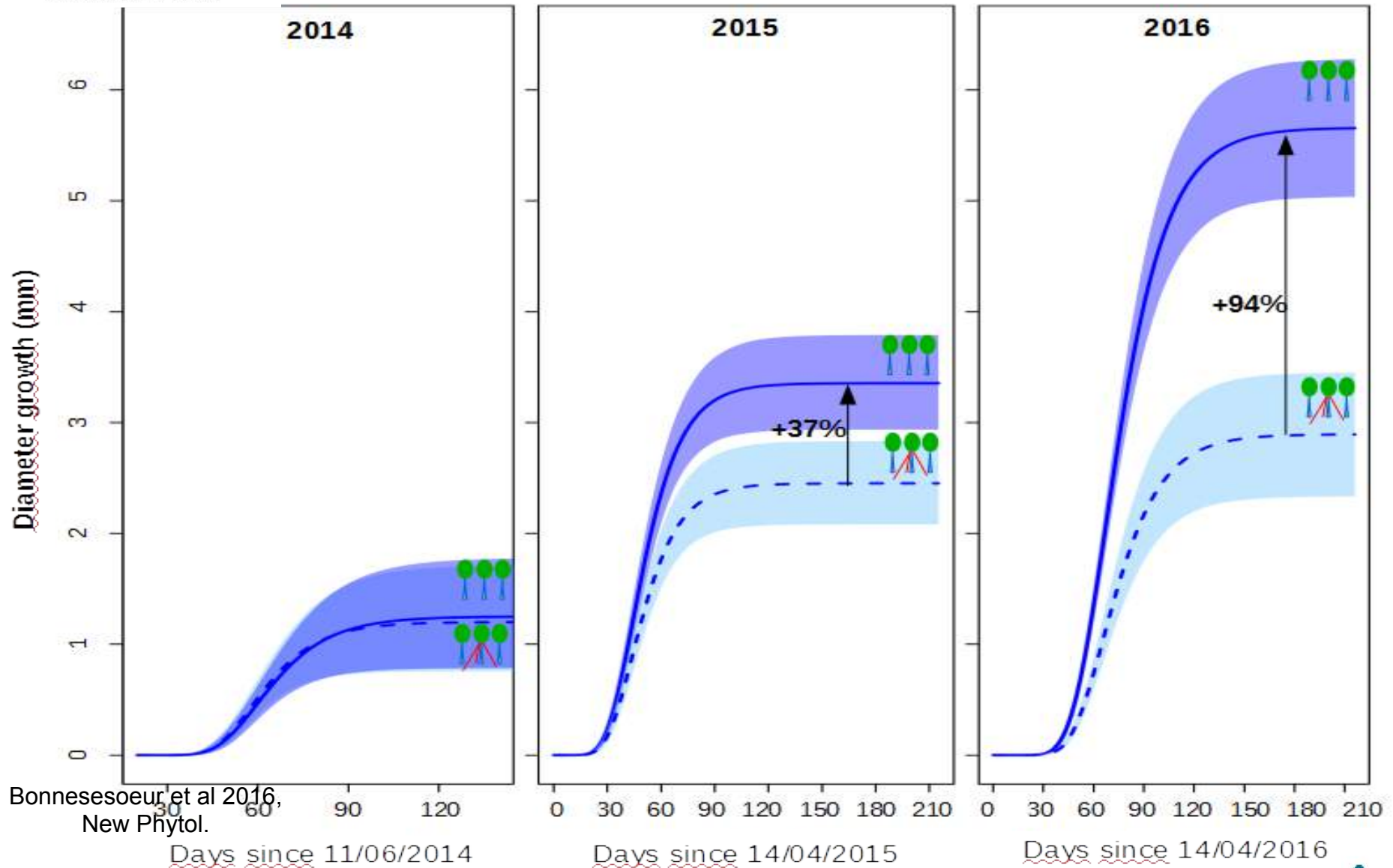


• **Haubannés**  
(pas de déformation due au vent dans le tronc)



• **+ flexions / « tempête » annuelle**

# Resultats - croissance en diamètre des troncs



↪ La perception de la déformation au vent est un facteur majeur de la croissance en diamètre du tronc (bois)

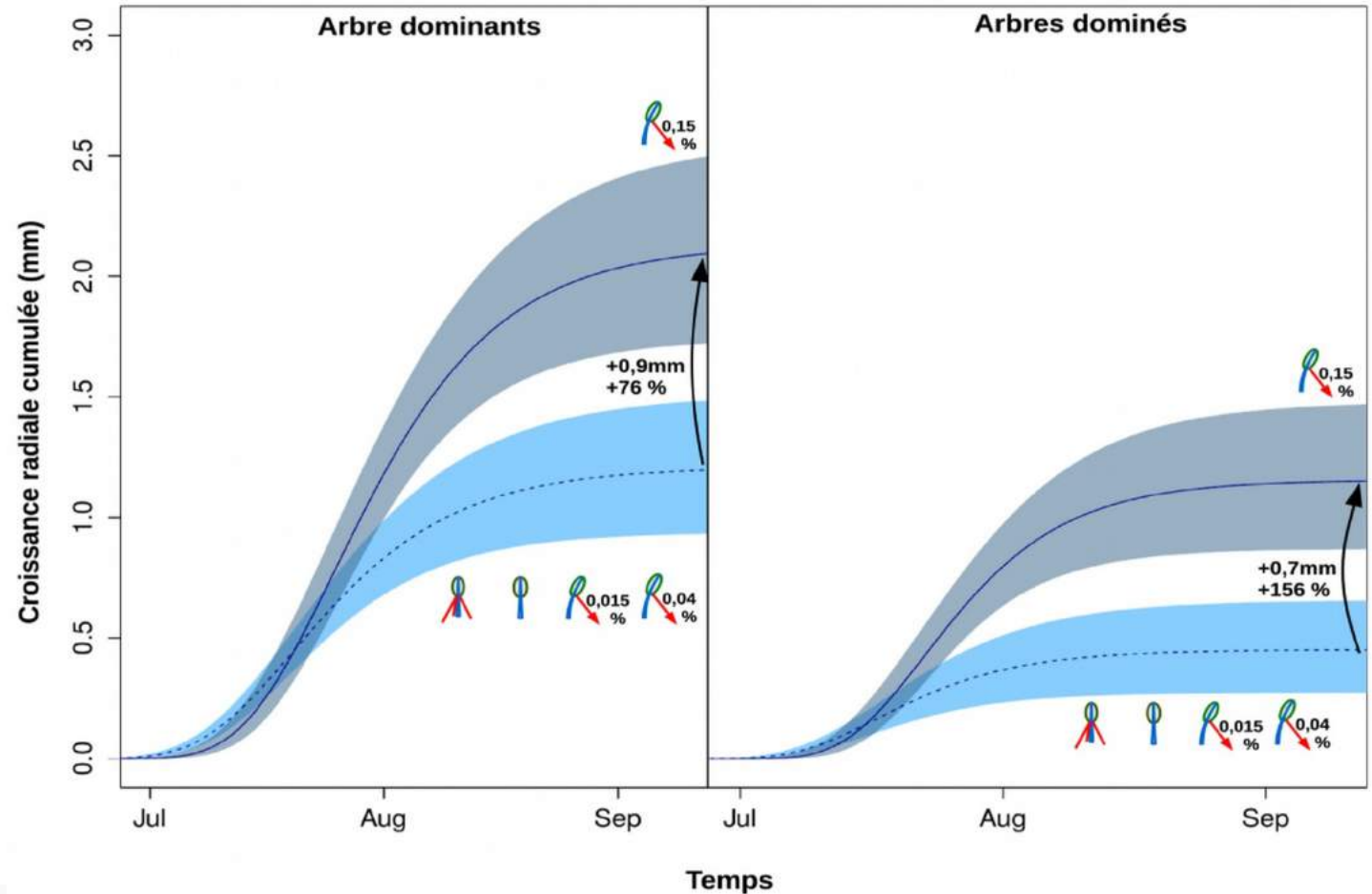
↪ jusqu'à **x2** dans la gamme des vents courants !!!

# Dispositif Vent-Eclair: résultats 2014

■ CI



Bonnesesoer et al 2016, New Phytol.



+0.15% pdt 8 ppm du temps  $\Rightarrow$  + 1mm de croissance = de + 80 à +160 % !!!!

La réponse d'acclimatation au vent est massive (x4)

(pas de vent , peu de bois)

l'arbre filtre le signal (vent bisannuels) grâce à sa mémoire



# Les arbres (petits et grands) s'acclimatent en permanence au vent



Rq Attention aux tailles et aux éclaircies qui **désaccordent** les arbres de leur environnement mécanique

Déclenchent un **processus de réaction d'acclimatation** qui va prendre plusieurs années

# Conséquences pour l'aménagement et la gestion

Laisser les arbres (ap-)prendre le vent à chaque étape

en pépinières



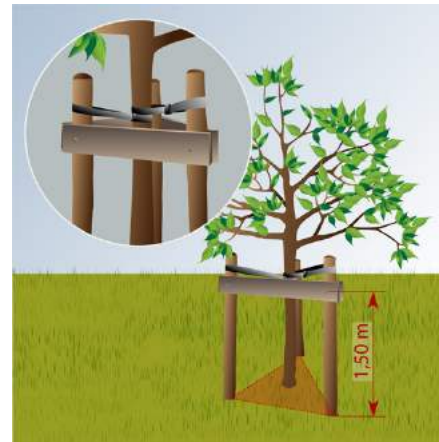
Ploquin et al, 2006

endurcissement mécanique et sélection

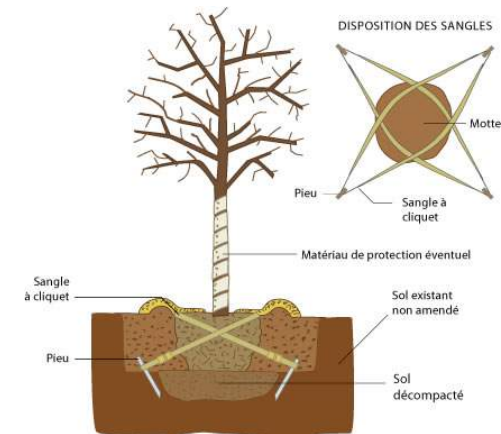
Plutôt que régulateurs de croissance chimiques:

dans le cahier des charges

Au moment de replanter



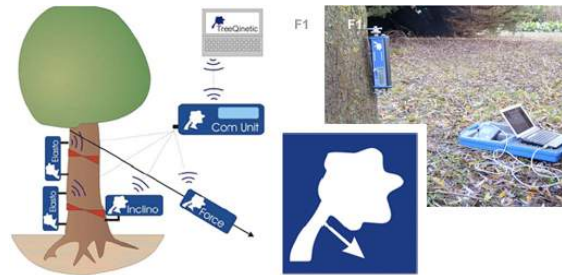
tuteurage tripode avec limitation de course



**Ancrage de motte**

# Sur les grands arbres

Faites intervenir des experts formés à la biomécanique



GD3A



Formation professionnelle avancée en biomécanique de l'arbre urbain



Améliorer les outils de diagnostic



## Passer du diagnostic de l'état instantané de l'arbre à un suivi longitudinal de sa capacité d'acclimatation (résilience)



Tout de suite: **suivi longitudinal**  
**de la croissance secondaire**

⇒ *PepiPIAF*

Dans quelques années : **suivi longitudinal** de la  
**capacité d'acclimatation mécanique** des arbres

⇒ *TreeSense*



Sur les beaux sujets

Sur tous les arbres



À plus long terme: **profiling génomique**  
(moins lourd: sur tous les arbres)



# MECA: an Interdisciplinary group in Biomechanics & Mechanobiology

2005-2015



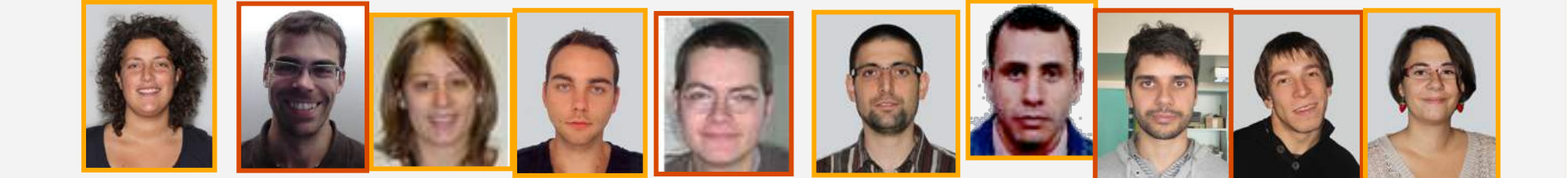
M Décourteix   JL Julien   N Leblanc-Fournier   C Lenne   B Moulia   P Drevet   C Coutand   E Badel   V Legué

**Bio-mechanics /  
ecophysiology**  
**Molecular Cytology**



N Brunel-Michac   J Franchel   C Boisselet   S Ploquin   B Girard

**Molecular  
physiology**  
**Mechanics /Physics**



J Roignant   G Pot   D Gourcilleau   K Tocquard   R Bastien   D Lopez   W Azri   JF Louf   F Hartmann   L Pomiès



L Martin   M Rodriguez   A Barbacci   C der Loughian   V Bonnesoeur

Merci de votre attention

Des questions ?



Echanger avec les acteurs sur le terrain

UCA

INRA

