

Modélisation de l'interaction vent - forêt



EPHYSE: Ecologie fonctionnelle et PHYSique de l'Environnement

David Pivato, doctorant

Encadrants : Yves Brunet, Sylvain Dupont

Thèse des Bois, Bordeaux, 4 février 2011



Introduction : objectifs et motivations

Impact d'une tempête sur
un massif forestier



Verse des cultures



→ Connaissance de la réponse au vent des végétaux

Introduction : objectifs et motivations

Sous l'effet du vent, toujours turbulent, les arbres bougent
(*oscillateurs amortis sujets à un chargement intermittent*)

Objectifs

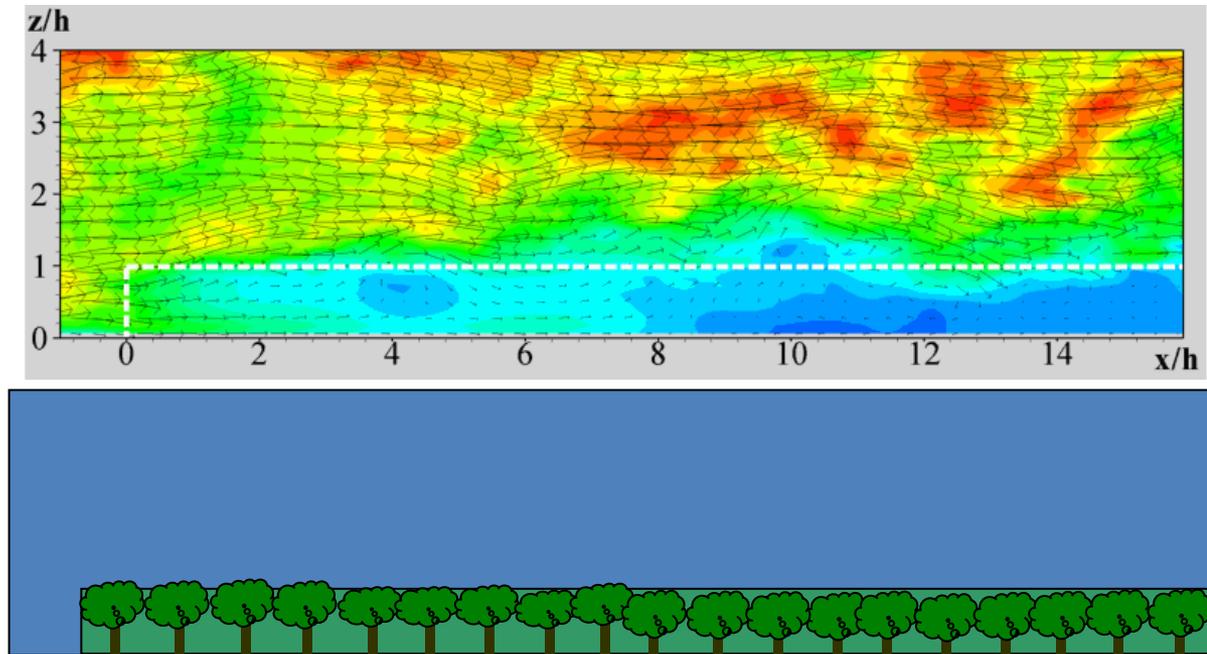
Mieux comprendre les interactions vent-plantes

Simuler le mouvement des arbres soumis à l'action du vent

Calculer les contraintes mécaniques ressenties

- **Modèle atmosphérique**
- Modèle du mouvement des plantes
- Modèle du mouvement des arbres (forêt)

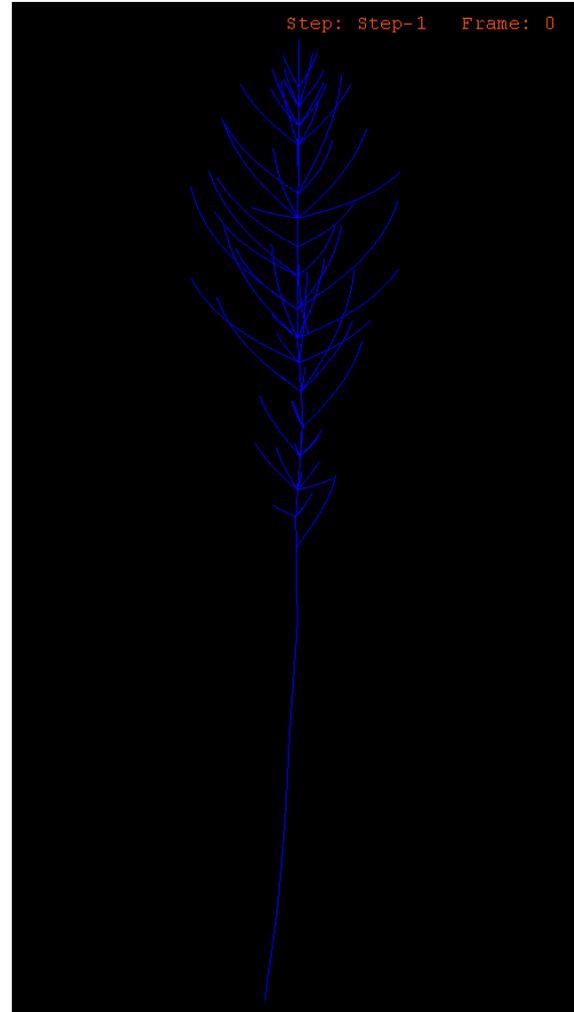
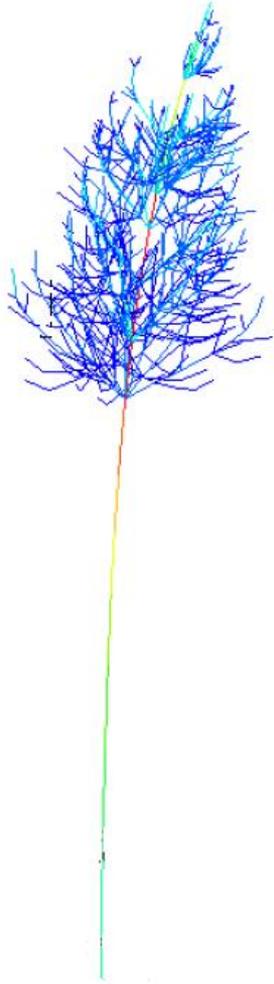
Modèle atmosphérique L.E.S.



- L.E.S. = Large Eddy Simulation = technique de modélisation des écoulements turbulents
- Modèle atmosphérique ARPS modifié pour **simuler les flux turbulents au-dessus et dans les canopées végétales**
- Cette nouvelle version de ARPS a été **validée**

- **Modèle atmosphérique**
- **Modèle du mouvement des plantes**
- **Modèle du mouvement des arbres (forêt)**

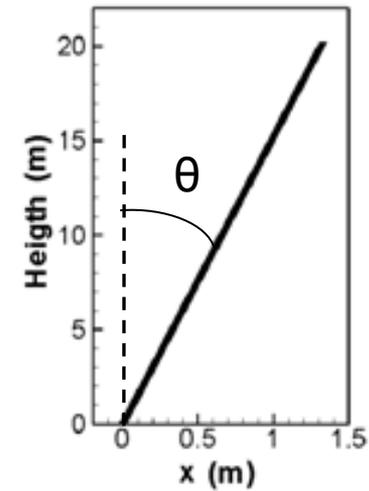
Un modèle d'arbre complet



Sellier et al, 2008

Mouvements simples

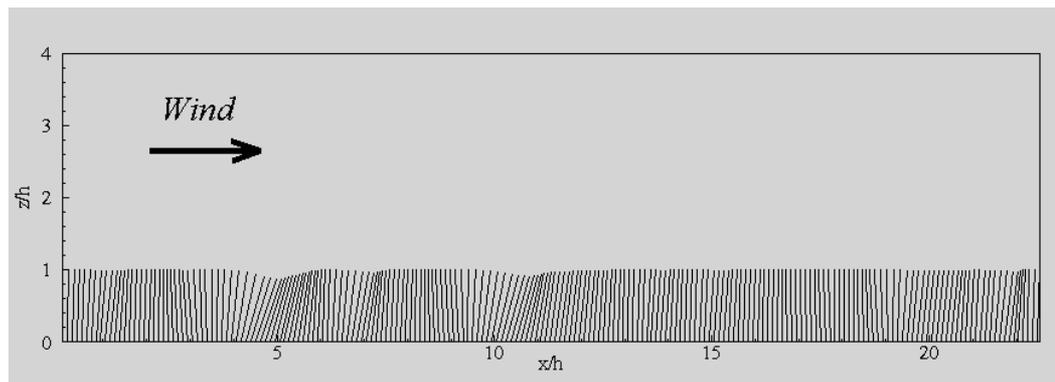
- Première approche : oscillateur mécanique rigide
- Propriétés identiques pour toutes les plantes de la canopée



θ angle
d'inclinaison

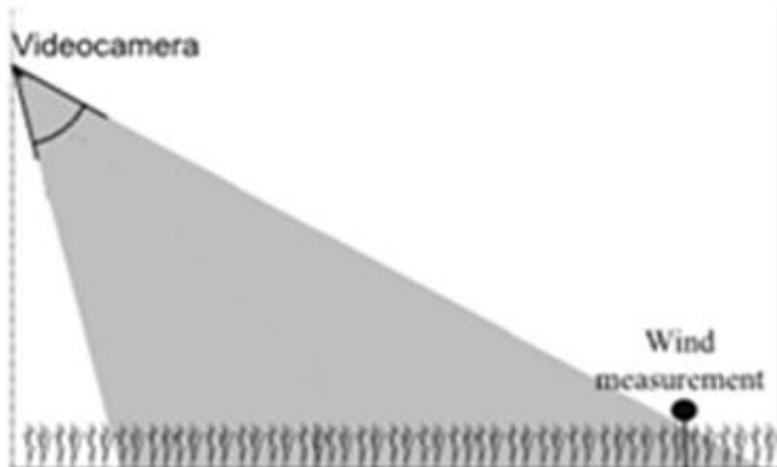
Mouvements simples

- Mouvement d'un peuplement : rangée d'oscillateurs identiques
- Couplage simple avec le modèle atmosphérique

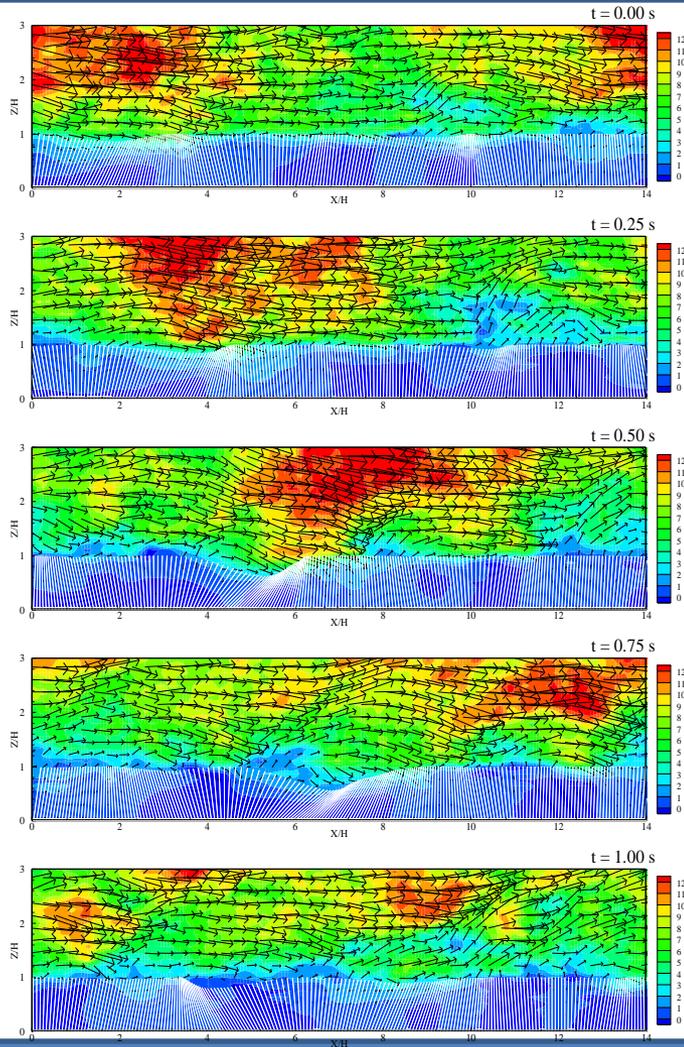


Validation sur un champ de luzerne

- Validation par rapport à des enregistrements vidéos (Py et al, 2006)



Validation sur un champ de luzerne



0.00 s

0.25 s

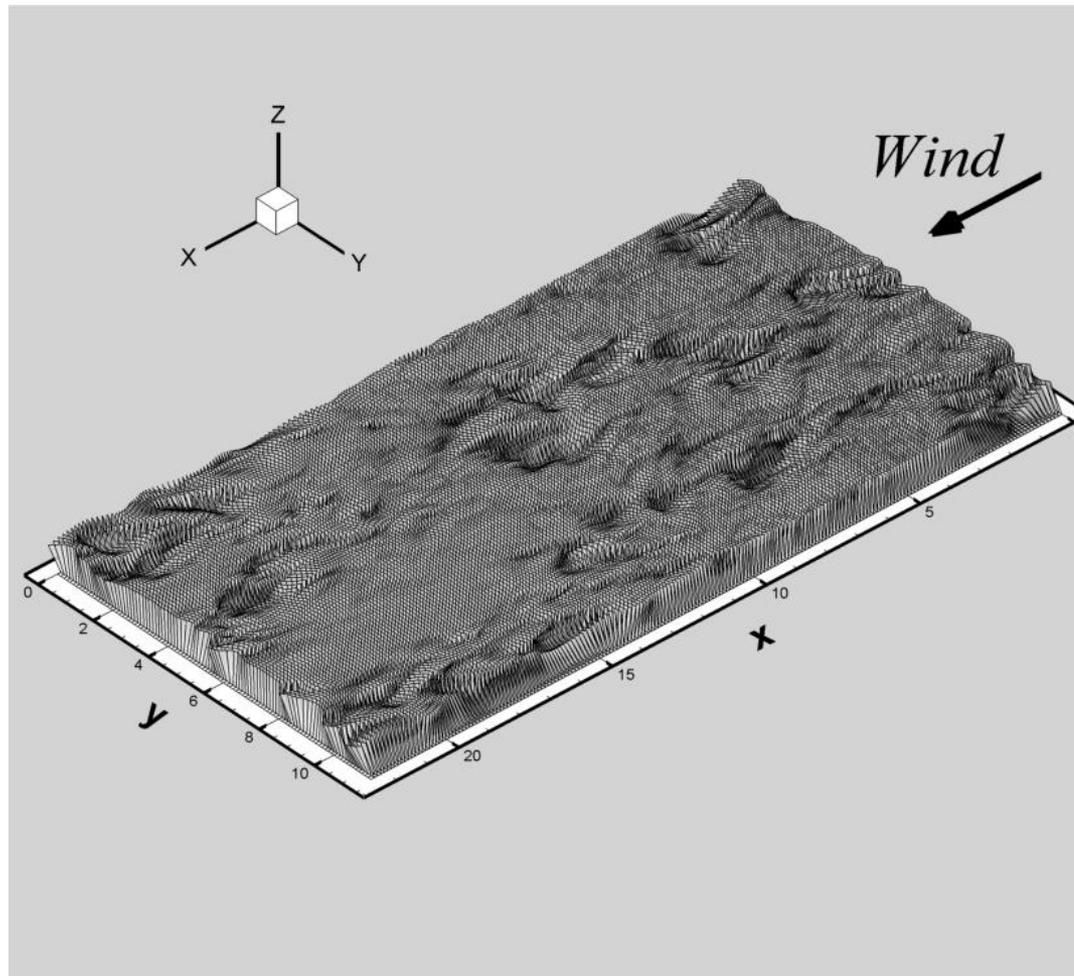
0.50 s

0.75 s

1.00 s

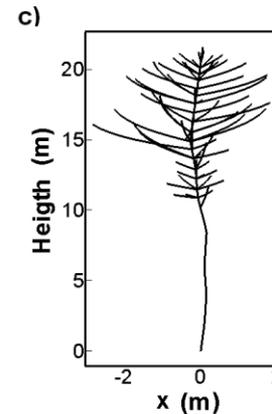
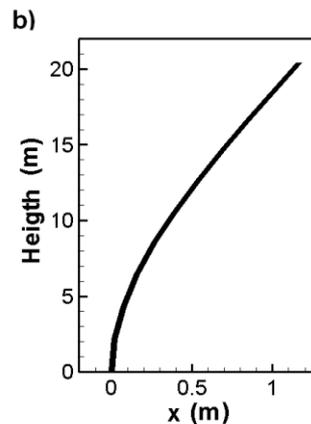
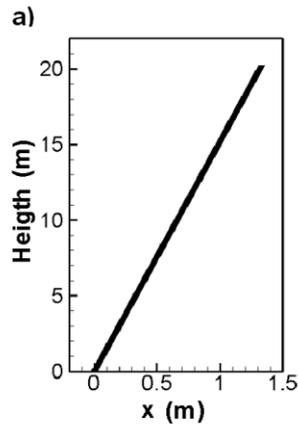
Vitesse des plantes
par rapport à la
vitesse du vent en
accord avec les
observations

Validation sur un champ de luzerne



- Modèle atmosphérique
- Modèle du mouvement des plantes
- Modèle du mouvement des arbres (forêt)

Extension du modèle à une forêt

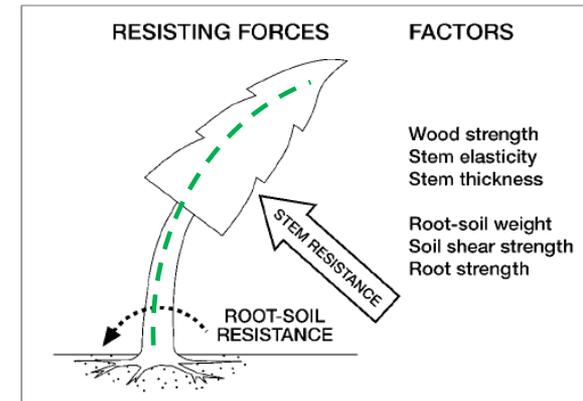
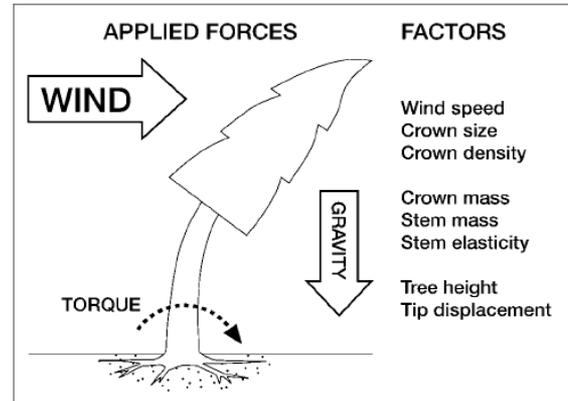


Un modèle de complexité intermédiaire :

- a) Modèle rigide, validé
- b) Modèle flexible
- c) Modèle de référence, validé

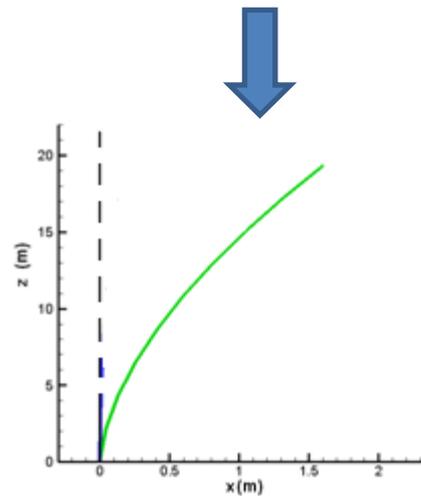


Extension du modèle à une forêt



Peltola et al, 2006

Modèle du mouvement
de l'arbre = tige flexible



Pivato et al, 2009

Décomposition du mouvement sur base modale

$$X(z,t) = q_1(t) \left[\text{red curve} \right] + q_2(t) \left[\text{blue curve} \right] + q_3(t) \left[\text{green curve} \right] + \dots$$

Chaque mouvement est représentable
comme une somme de formes simples

- Equation d'Euler-Bernouilli

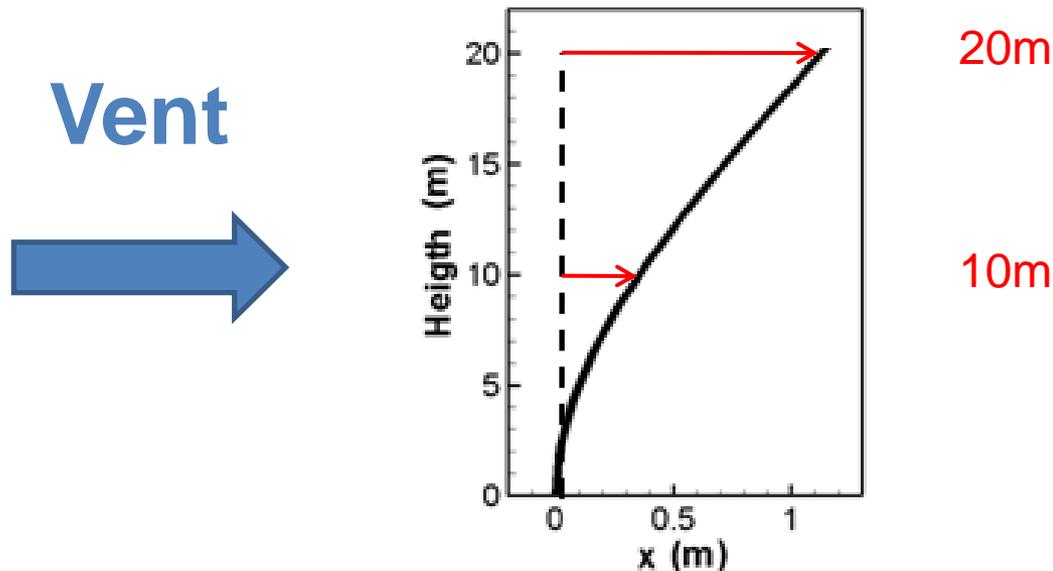
$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2z/dx^2}{(1 + (dz/dx)^2)^{3/2}} = \frac{M}{EI}$$

- Hypothèse des petits déplacements

$$\frac{d^2x}{dz^2} = \frac{M}{EI}$$

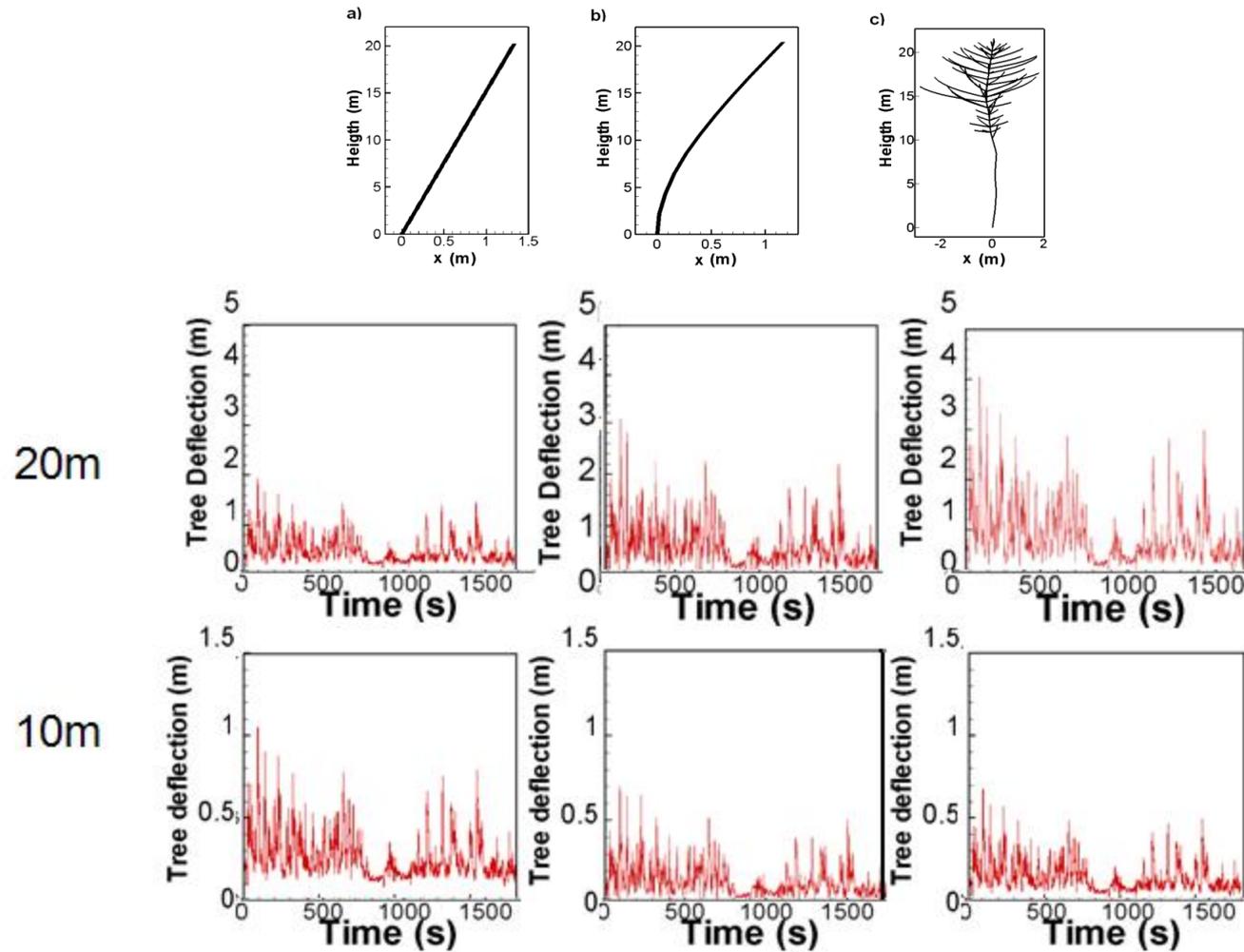
Premier test du modèle flexible

- Calcul de la déflexion de l'arbre suivant l'axe x



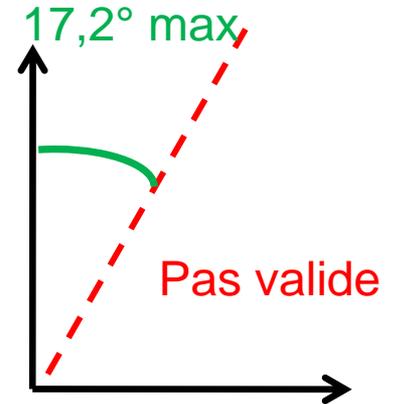
- Comparaison entre les 3 modèles pendant 1800 s

Premier test du modèle flexible (2 modes)



Limites du modèle

- **Modèle linéaire : petits déplacements**
 - ✓ « Extension » de la longueur de l'arbre
 - ✓ Restreint à des vents faibles
- Les systèmes linéaires sont plus simples à étudier mais ne peuvent être que des approximations de systèmes **non-linéaires** plus complexes.
- Grands déplacements :
mécanique non linéaire → autre modèle



Vers un modèle non-linéaire

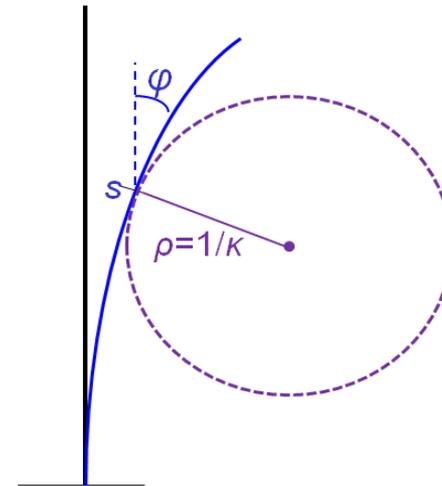
- Equation d'Euler-Bernouilli

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2z/dx^2}{(1 + (dz/dx)^2)^{3/2}} = \frac{M}{EI}$$



- Hypothèse des petits déplacements

~~$$EI \frac{d^2x}{dz^2} = M$$~~



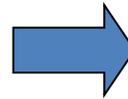
φ angle d'inclinaison
 s abscisse curviligne
 K courbure
 ρ rayon de courbure

Vers un modèle non-linéaire

Modèle non valide en grands déplacements

$$X(z, t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) \Phi_i(z)$$

$$m_i \frac{d^2 q_i(t)}{dt^2} + c_i \frac{dq_i(t)}{dt} + k_i q_i(t) = \rho \int_0^l C_D \left| u - \Phi_i \frac{dq_i(t)}{dt} \right| \left(u - \Phi_i \frac{dq_i(t)}{dt} \right) \Phi_i dz$$



Modèle plus complexe

$$\frac{\partial x}{\partial s} = \sin \varphi$$

$$\frac{\partial z}{\partial s} = \cos \varphi$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial s} = \kappa$$

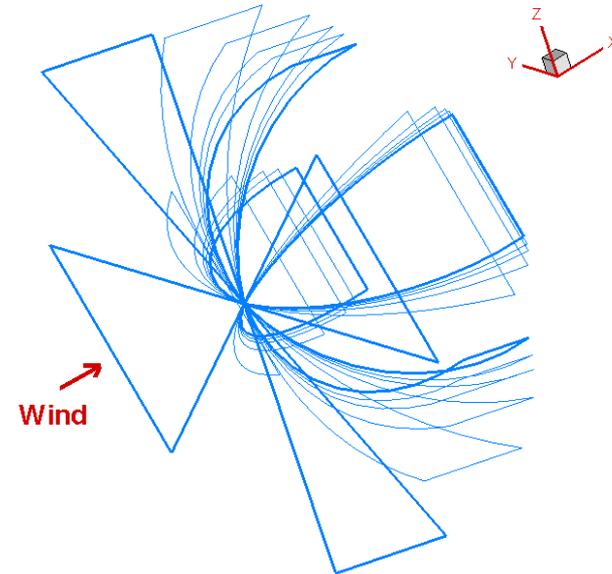
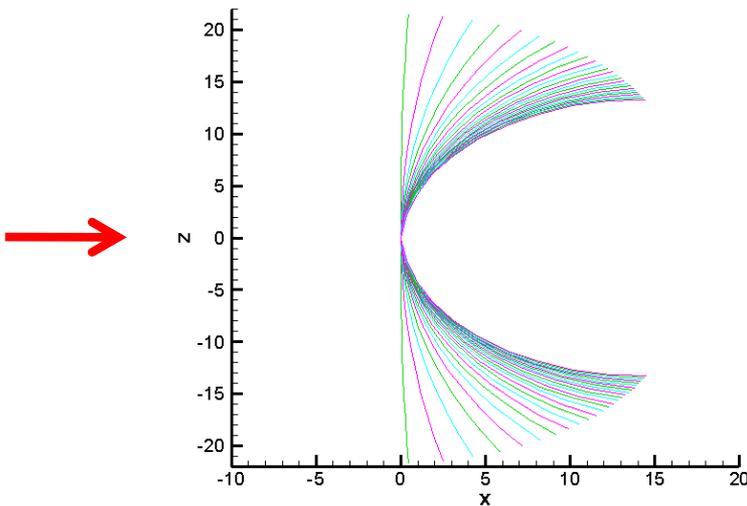
$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial s^2} = \frac{\partial \kappa}{\partial s} = \frac{1}{EI} \frac{\partial M_f}{\partial s} = -\frac{1}{EI} \int_0^s \left(\frac{\partial F_x}{\partial s} \cos \varphi - \frac{\partial F_z}{\partial s} \sin \varphi \right) ds$$

$$\frac{\partial F_x}{\partial s} = \rho C_D A_f U^2 \cos^2 \varphi \cos \varphi - C_{damp,lin} \frac{\partial x}{\partial t} - M_{lin} \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial F_z}{\partial s} = -\rho C_D A_f U^2 \cos^2 \varphi \sin \varphi + C_{damp,lin} \frac{\partial z}{\partial t} + M_{lin} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2}$$

Cas modélisés et codés

- Cas statiques
- Cas « dynamiques » = succession de cas statiques (principe de D'Alembert)



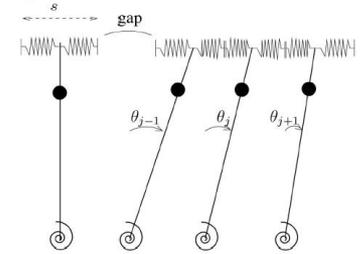
- Arbre : nécessité d'une méthode de résolution plus robuste

Conclusion

- Modèle simple du mouvement des plantes validé (Dupont et al, 2009 JFM)
- Extension en cours du modèle aux modes de vibration flexibles pour simuler le mouvement des arbres
 - Plus facile à introduire dans le modèle atmosphérique
 - Ce modèle permettra des simulations de mouvement de forêt à l'échelle de paysages hétérogènes

Perspectives

- Modéliser l'interaction entre arbres voisins
→ ajout force de contact



- Modéliser la rupture des arbres et étudier l'effet des trouées sur l'écoulement du vent



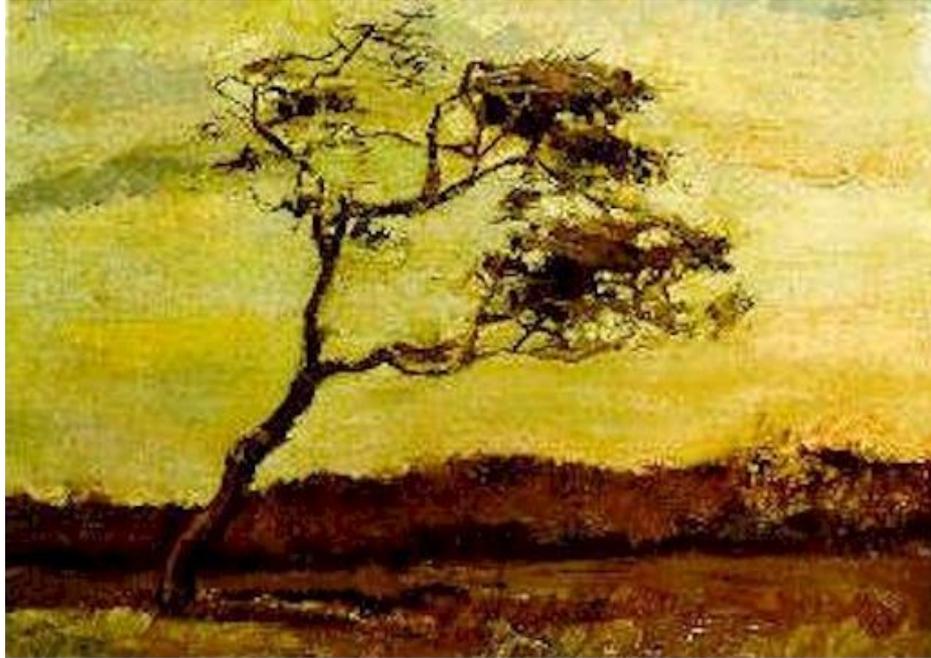
- Etudes sur paysages hétérogènes



Perspectives

- Quantifier la vulnérabilité des arbres au vent en fonction de leur position dans le paysage
- Limiter les dégâts sur les forêts et les cultures lors de tempêtes ou vents violents
- Améliorer la croissance des plantes et la production de biomasse dues à la thigmomorphogénèse
- Générer des animations réalistes (film d'animation, jeux video...)

MERCI !



A Wind Beaten Tree, Vincent Van Gogh