Modélisation du développement architectural, de l'acclimatation et de l'ancrage du système racinaire du pin maritime

SAINT CAST Clément[1,2], DEFOSSEZ Pauline[2], MEREDIEU Céline[1], PAGES Loïc[3], DANJON Frédéric[1]

[1]BIOGECO, INRA, Univ. Bordeaux, 33610 Cestas, France

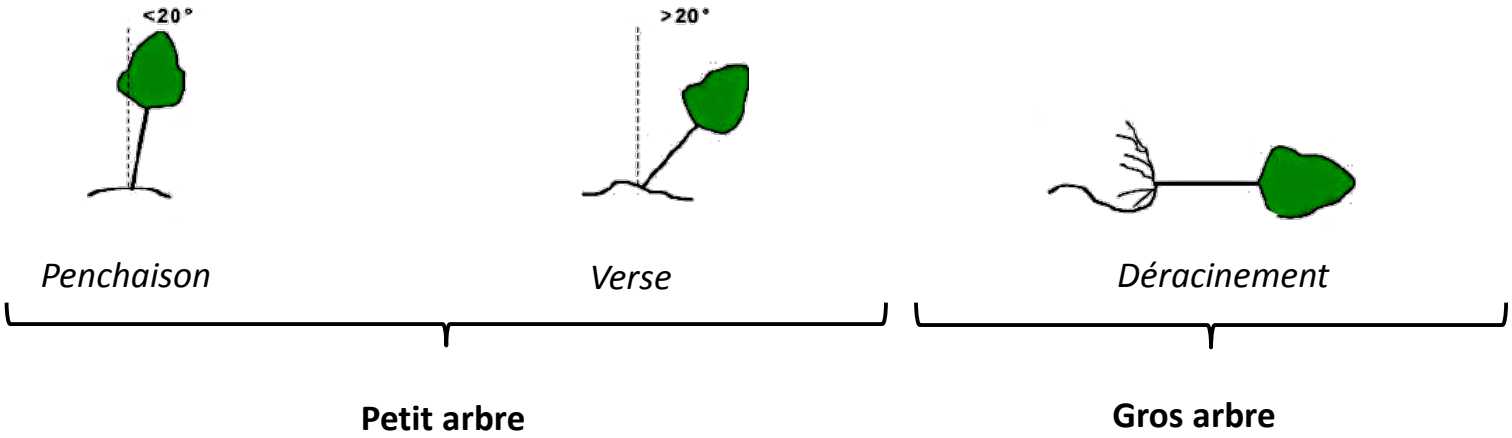
[2]ISPA, INRA, Bordeaux Science Agro, 33140 Villenave d'Ornon, France

[3]PSH, INRA, 84914 Avignon, France

CAQSIS 2017- FCBA Bordeaux, 28-30 mars 2017

Introduction

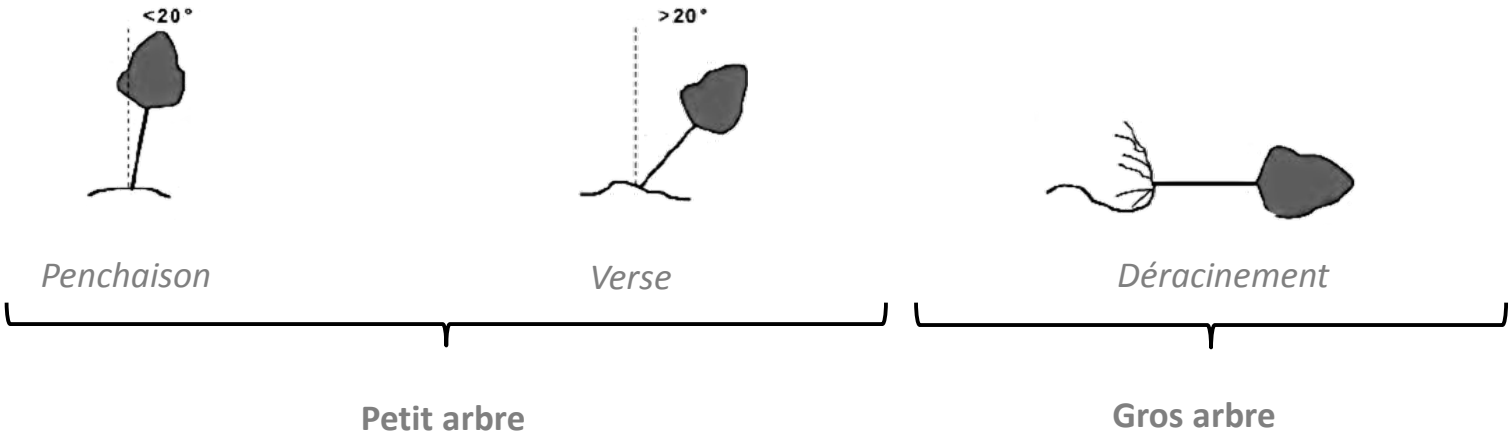
- Nombreux aléas ➔ Dépérissement et mortalité des peuplements forestiers
- Tempête ➔ Première cause de dégâts forestiers en Europe



Volis, penchaison, verse et chablis de pin maritime après la tempête Klaus de janvier 2009 dans le massif des Landes de Gascogne

Introduction

- Nombreux aléas ➔ Dépérissement et mortalité des peuplements forestiers
- Tempête ➔ Première cause de dégâts forestiers en Europe



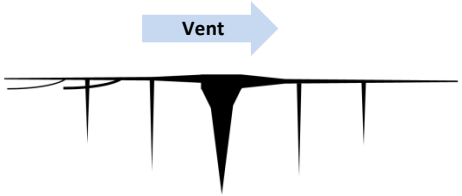
- Ancrage ➔ Fonction vitale de l'arbre ➔ ***Architecture racinaire***
- Evolution des mécanismes au cours du développement de l'arbre

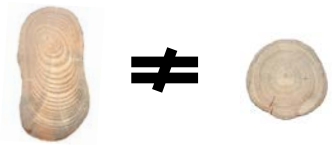
Introduction

Problématique :

- Comprendre le rôle des types racinaires dans la capacité d'ancrage de l'arbre au cours de son développement.

- Caractériser les mécanismes d'acclimatation du système racinaire dans l'ancrage et juger de leur efficacité mécanique.



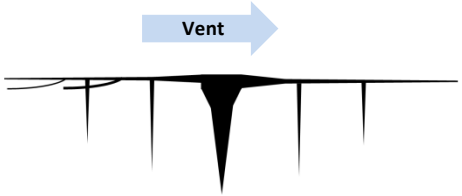


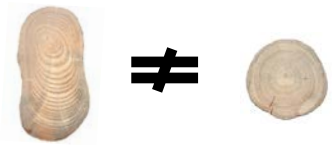
Introduction

Problématique :

- Comprendre le rôle des types racinaires dans la capacité d'ancrage de l'arbre au cours de son développement.

- Caractériser les mécanismes d'acclimatation du système racinaire dans l'ancrage et juger de leur efficacité mécanique.





Espèce modèle :

- *Pin maritime en sol sableux*
- *Architecture racinaire organisée et stable*
- *Pas de racines adventives et de développement retardé*
- *Acclimatation au sol et au vent dominant → Modifications structurelles*
- *Base de données structurées en chronoséquence (1 an → 50 ans)*

Méthodologie

Base de données de systèmes racinaires de Pin maritime

- Semis
- Lande mésophile
- 1 à 50 ans
- Absence de certains stades de développement
- Conservation de données pour la validation du modèle

Modèle de croissance racinaire

Représenter la mise en place de l'architecture du système racinaire au cours du temps

Simulation de stades de développement différents

Acclimatation

Sol et vent dominant

- **Définir des paramètres et/ou des fonctions mathématiques modélisant ces processus**

Modèle biomécanique

Représenter le comportement mécanique du système racinaire

Maquettes simplifiées issues de la base de données

Système racinaire simulé depuis le modèle de croissance racinaire

Maquettes simplifiées issues du modèle racinaire

Simulation pour des systèmes racinaires d'âge croissant plus ou moins acclimatés

Maquette simplifiée

Système racinaire simulé

Méthodologie

Base de données de systèmes racinaires de Pin maritime

- Semis
- Lande mésophile
- 1 à 50 ans
- Absence de certains stades de développement
- Conservation de données pour la validation du modèle

Modèle de croissance racinaire

Représenter la mise en place de l'architecture du système racinaire au cours du temps

Simulation de stades de développement différents

Acclimatation

Sol et vent dominant

- **Définir des paramètres et/ou des fonctions mathématiques modélisant ces processus**

Modèle biomécanique

Représenter le comportement mécanique du système racinaire

Maquettes simplifiées issues de la base de données

Système racinaire simulé depuis le modèle de croissance racinaire

Maquettes simplifiées issues du modèle racinaire

Simulation pour des systèmes racinaires d'âge croissant plus ou moins acclimatés

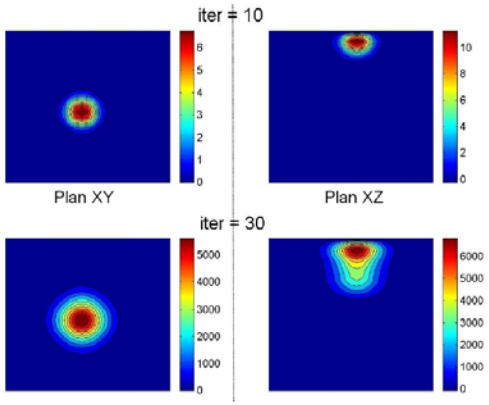
Maquette simplifiée

Système racinaire simulé

Les modèles 3D de croissance racinaire

Modèle de densité

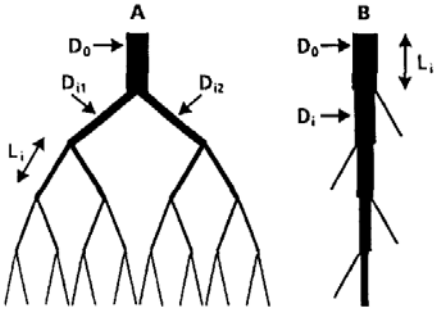
- Représentation abstraite
- Description de « quantité » au cours du temps (nombre, longueur,…)



Visualisation à deux itérations différentes, des densités d'apex projetées en 2D dans le plan XY (gauche) et dans le plan XZ (droite) (Bonneu, 2011)

Modèle de branchaison fractal

- Basé sur la géométrie fractale et le pipe model
- Prédiction de ramification, taille du système racinaire,…
- Relation statique observée localement et étendue le long du système racinaire



Van Noordwijk and Purnomosidi, 1995

Modèle de structure

- Basé sur des processus de croissance racinaire
- Description de l'architecture racinaire de manière explicite
- Possibilité d'être couplé à un modèle de sol et/ou d'assimilat carboné

Collet *et al.*, 2006 Jourdan *et al.*, 1997

Root Typ (Pagès et al., 2004)

Module de développement

- Initialisation
- Croissance axiale et radiale
- Géométrie
- Ramification
- Réitération
- Transition
- Décès et abscission

Quercus petraea
Collet & Pagès, 2006

Prunus Persica
Vercambre et al., 2003

Module de sol

- Ramification
- Croissance axiale
- Direction de croissance

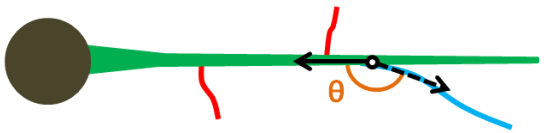
Pagès et al., 2004
Stellaria media.

- *Caractérisation des différents types racinaires :*

- Mise en œuvre d'une analyse cluster pour classer les racines en groupes distincts

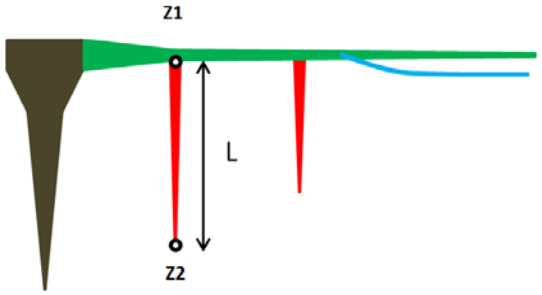
- Deux variables utilisées : **angle d'insertion** et **géotropisme**

  - Angle d'insertion des racines :



  - Géotropisme des racines :

    ➔ (Z2-Z1)/Longueur

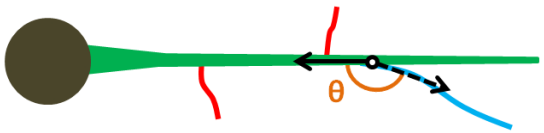


- *Caractérisation des différents types racinaires :*

- Mise en œuvre d'une analyse cluster pour classer les racines en groupes distincts

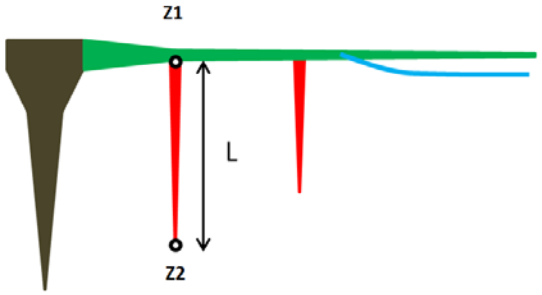
- Deux variables utilisées : **angle d'insertion** et **géotropisme**

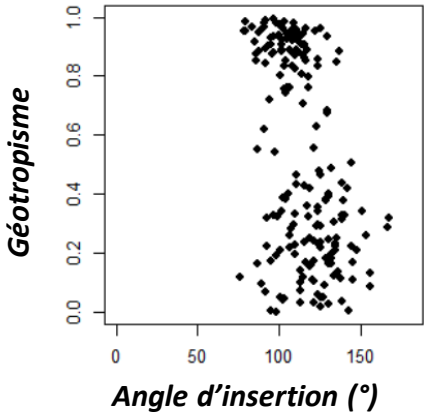
- Angle d'insertion des racines :



- Géotropisme des racines :

➔ (Z2-Z1)/Longueur



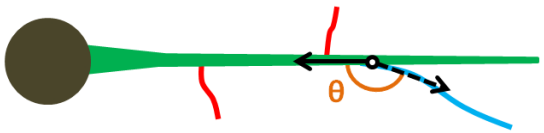


- *Caractérisation des différents types racinaires :*

- Mise en œuvre d'une analyse cluster pour classer les racines en groupes distincts

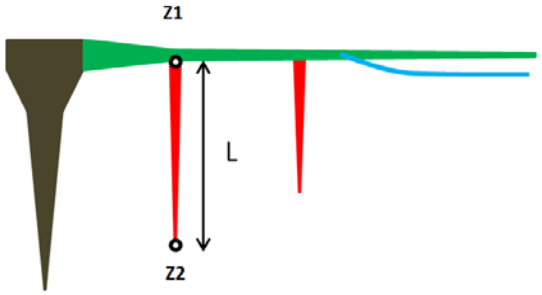
- Deux variables utilisées : **angle d'insertion** et **géotropisme**

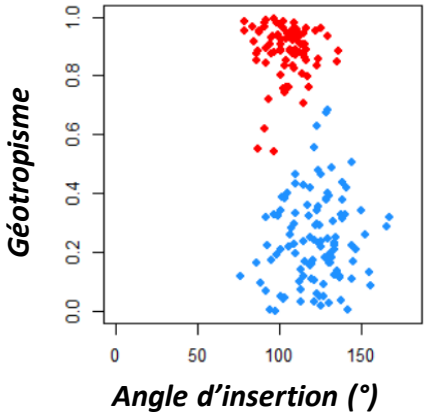
- Angle d'insertion des racines :



- Géotropisme des racines :

➔ (Z2-Z1)/Longueur





Angle d'insertion (p-value = 8.1e-13) :

- **104.3°**
- **122.2°**

Géotropisme (p-value < 2.2e-16) :

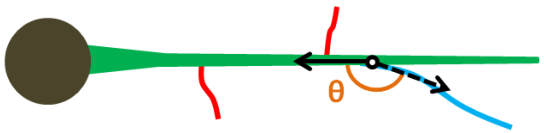
- **0.88**
- **0.24**

- *Caractérisation des différents types racinaires :*

- Mise en œuvre d'une analyse cluster pour classer les racines en groupes distincts

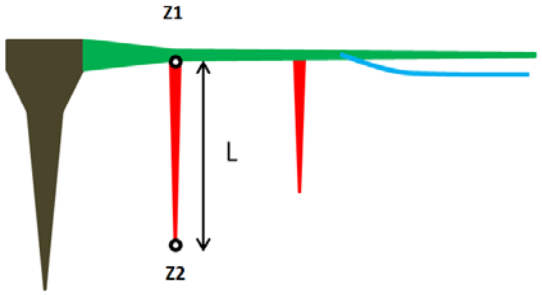
- Deux variables utilisées : **angle d'insertion** et **géotropisme**

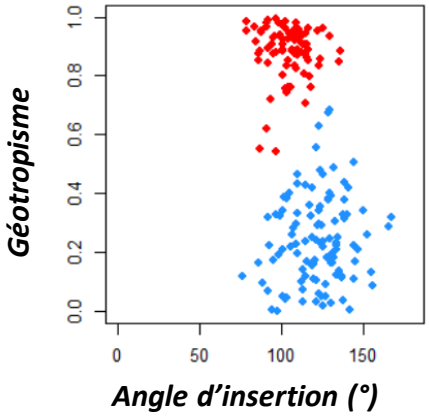
- Angle d'insertion des racines :



- Géotropisme des racines :

➔ (Z2-Z1)/Longueur





Angle d'insertion (p-value = 8.1e-13) :

- **104.3°**
- **122.2°**

Géotropisme (p-value < 2.2e-16) :

- **0.88**
- **0.24**

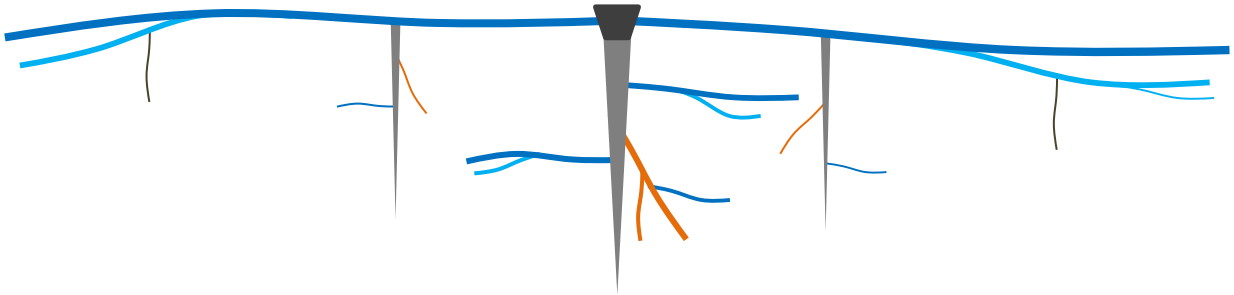
- ***Conservation de la valeur d'angle et du géotropisme avec l'âge***
- ***Pas de différence selon la position des racines sur l'axe porteur***
- ***Pas de différence selon les dimensions de l'axe porté***

- Polymorphisme racinaire ➔ 5 types distincts caractérisés par des paramètres spécifiques
- Présence de tous les types racinaires à partir de 3 ans

Types porteurs

Proportion types portes

	Pivot surface	Pivot profond	Horizontale1	Oblique	Horizontale2
Angle insertion	0	108.7 (±0.19)	107.1 (±18)	143.9 (±17)	120.3 (±0.26)
Géotropisme	0.9 (±0.1)	0.8 (±0.1)	0.17 (±0.1)	0.7 (±0.2)	0.24 (±0.1)
…	…	…	…	…	…
Horizontale1	1	0.47	0	0.45	0
Pivot profond	0	0	0.45	0	0.45
Oblique	0	0.53	0	0.55	0
Horizontale2	0	0	0.55	0	0.55

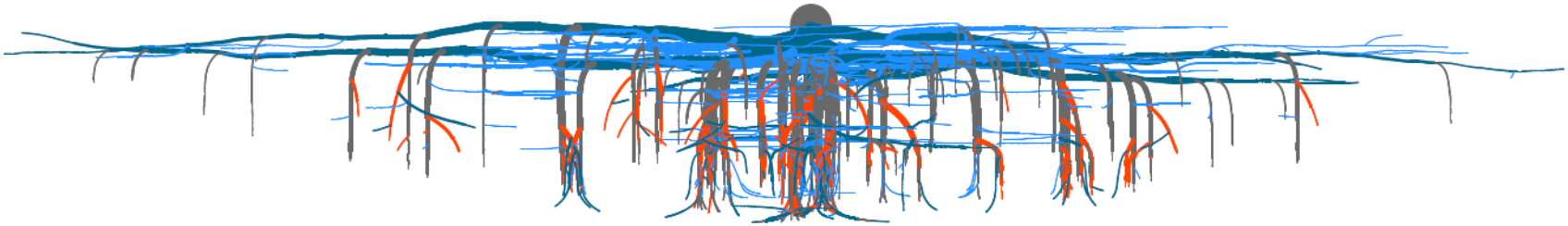


- Polymorphisme racinaire ➔ 5 types distincts caractérisés par des paramètres spécifiques
- Présence de tous les types racinaires à partir de 3 ans

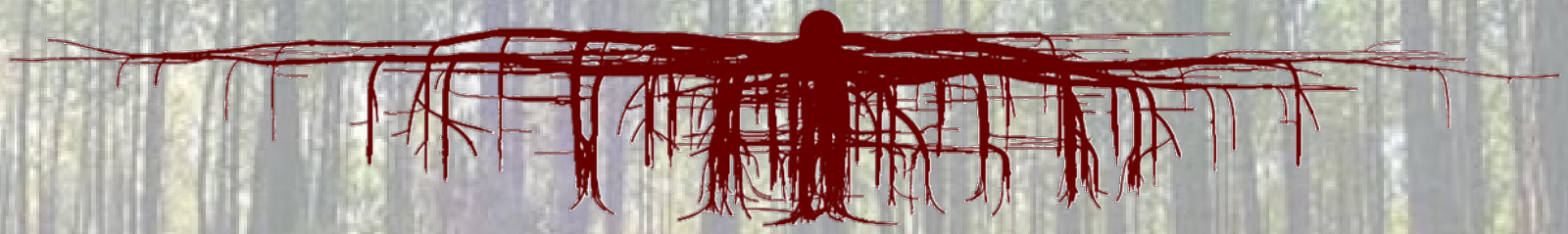
Types porteurs

Proportion types portes

	Pivot surface	Pivot profond	Horizontale1	Oblique	Horizontale2
Angle insertion	0	108.7 (±0.19)	107.1 (±18)	143.9 (±17)	120.3 (±0.26)
Géotropisme	0.9 (±0.1)	0.8 (±0.1)	0.17 (±0.1)	0.7 (±0.2)	0.24 (±0.1)
…	…	…	…	…	…
Horizontale1	1	0.47	0	0.45	0
Pivot profond	0	0	0.45	0	0.45
Oblique	0	0.53	0	0.55	0
Horizontale2	0	0	0.55	0	0.55



Modélisation de l'influence du sol sur le développement du système racinaire du pin maritime



- Le sol engendre des modifications structurelles importantes : mortalité, réitérations traumatiques,…

  ↳ Modification de l'architecture du système racinaire

  ↳ Elément majeur de l'ancrage

- ***<u>Objectif :</u> Quel est l'impact de ces modifications sur la capacité d'ancrage de l'arbre ?***

- Le sol engendre des modifications structurelles importantes : mortalité, réitérations traumatiques,…

  ↳ Modification de l'architecture du système racinaire

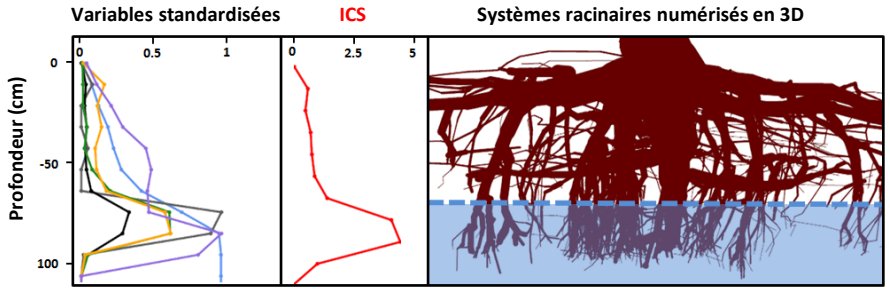
  ↳ Elément majeur de l'ancrage

- ***Objectif :*** ***Quel est l'impact de ces modifications sur la capacité d'ancrage de l'arbre ?***

- ***Pin maritime en sol sableux :***
  - Base de données de systèmes racinaires numérisés en 3D de 1 à 50 ans.
  - Analyse de plusieurs variables le long d'un gradient de profondeur

- Nombre de racines
- Nombre total/Volume total de racines
- Longueur totale /Volume total de racines
- Géotropisme moyen des racines
- Défilement moyen des racines
- Nombre de réitérations

➔ **Index de contrainte de sol (ICS)**



- Le sol engendre des modifications structurelles importantes : mortalité, réitérations traumatiques,…

  ↳ Modification de l'architecture du système racinaire

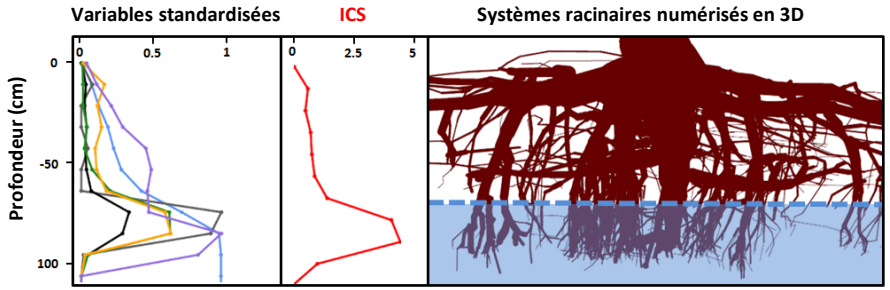
  ↳ Elément majeur de l'ancrage

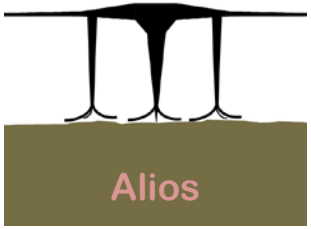
- ***<u>Objectif :</u> Quel est l'impact de ces modifications sur la capacité d'ancrage de l'arbre ?***

- ***<u>Pin maritime en sol sableux :</u>***
  - Base de données de systèmes racinaires numérisés en 3D de 1 à 50 ans.
  - Analyse de plusieurs variables le long d'un gradient de profondeur

- Nombre de racines
- Nombre total/Volume total de racines
- Longueur totale /Volume total de racines
- Géotropisme moyen des racines
- Défilement moyen des racines
- Nombre de réitérations

➔ **Index de contrainte de sol (ICS)**





- Le sol engendre des modifications structurelles importantes : mortalité, réitérations traumatiques,…

  ↳ Modification de l'architecture du système racinaire

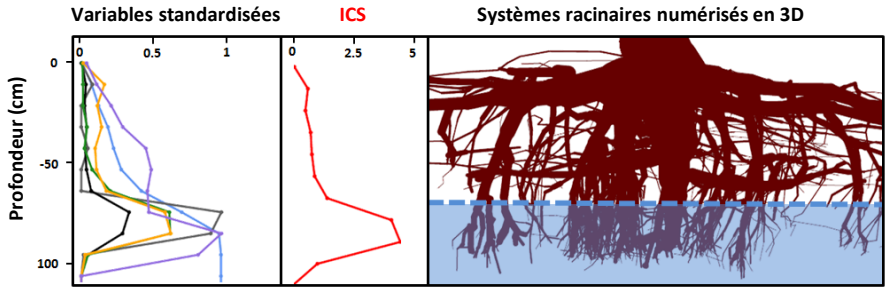
  ↳ Elément majeur de l'ancrage

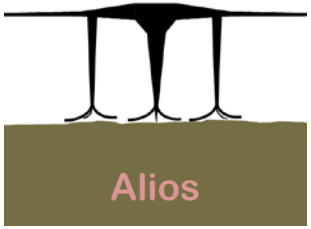
- ***<u>Objectif :</u> Quel est l'impact de ces modifications sur la capacité d'ancrage de l'arbre ?***

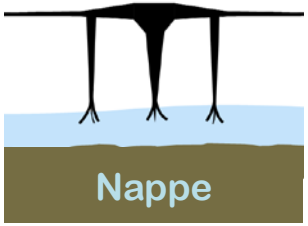
- ***<u>Pin maritime en sol sableux :</u>***
  - Base de données de systèmes racinaires numérisés en 3D de 1 à 50 ans.
  - Analyse de plusieurs variables le long d'un gradient de profondeur

- Nombre de racines
- Nombre total/Volume total de racines
- Longueur totale /Volume total de racines
- Géotropisme moyen des racines
- Défilement moyen des racines
- Nombre de réitérations

➔ **Index de contrainte de sol (ICS)**







- Le sol engendre des modifications structurelles importantes : mortalité, réitérations traumatiques,…

  ↳ Modification de l'architecture du système racinaire

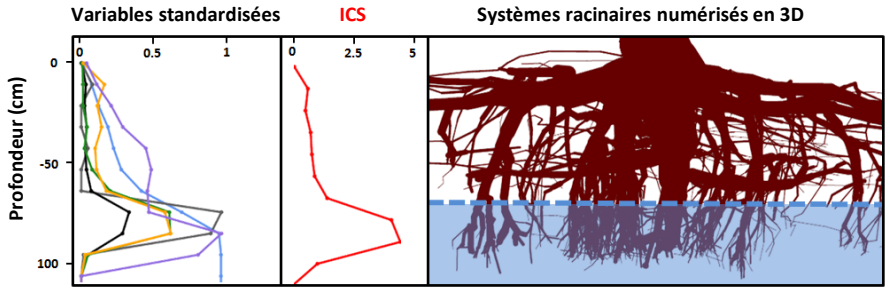
  ↳ Elément majeur de l'ancrage

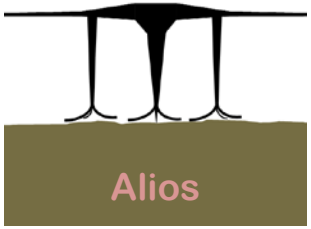
- ***<u>Objectif :</u> Quel est l'impact de ces modifications sur la capacité d'ancrage de l'arbre ?***

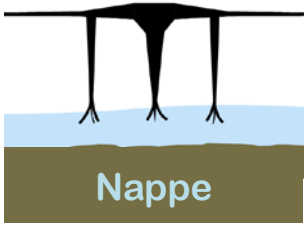
- ***<u>Pin maritime en sol sableux :</u>***
  - Base de données de systèmes racinaires numérisés en 3D de 1 à 50 ans.
  - Analyse de plusieurs variables le long d'un gradient de profondeur

- Nombre de racines
- Nombre total/Volume total de racines
- Longueur totale /Volume total de racines
- Géotropisme moyen des racines
- Défilement moyen des racines
- Nombre de réitérations

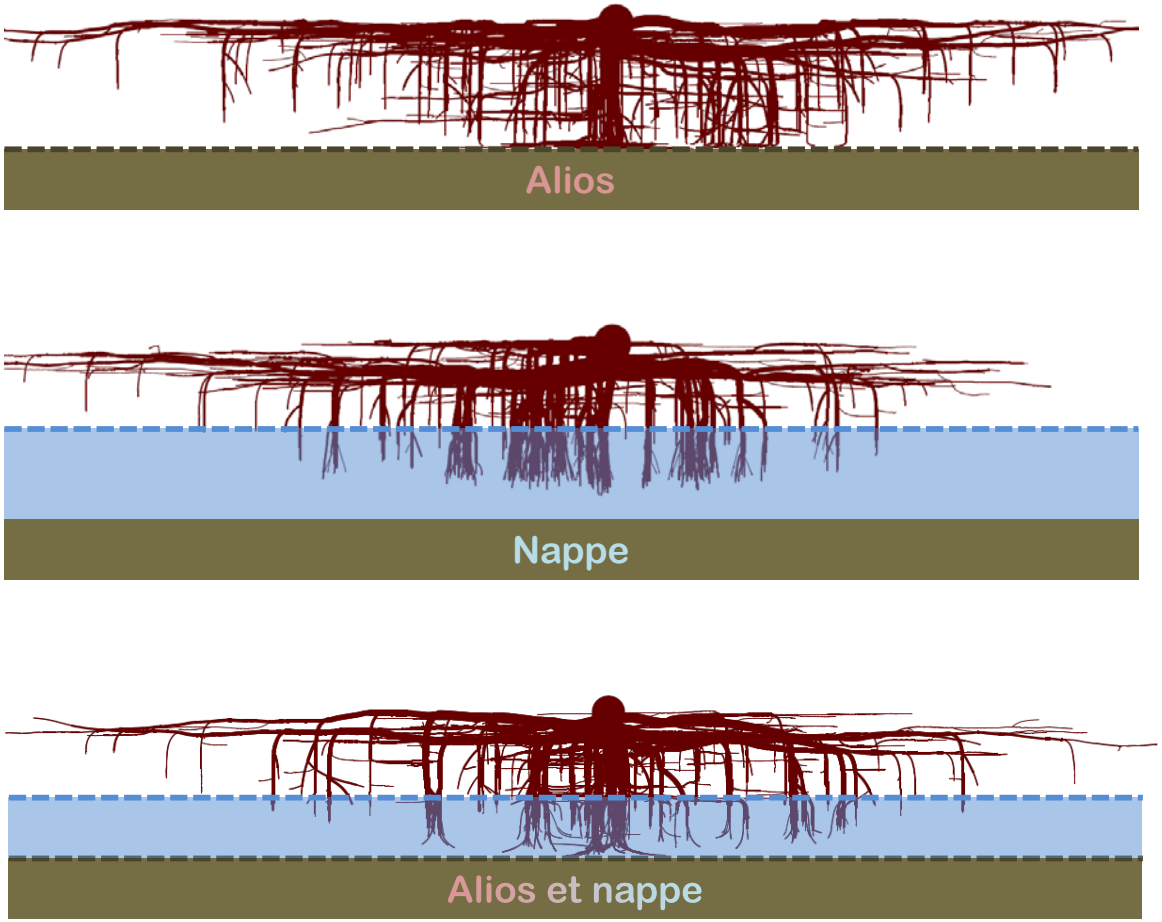
➔ **Index de contrainte de sol (ICS)**







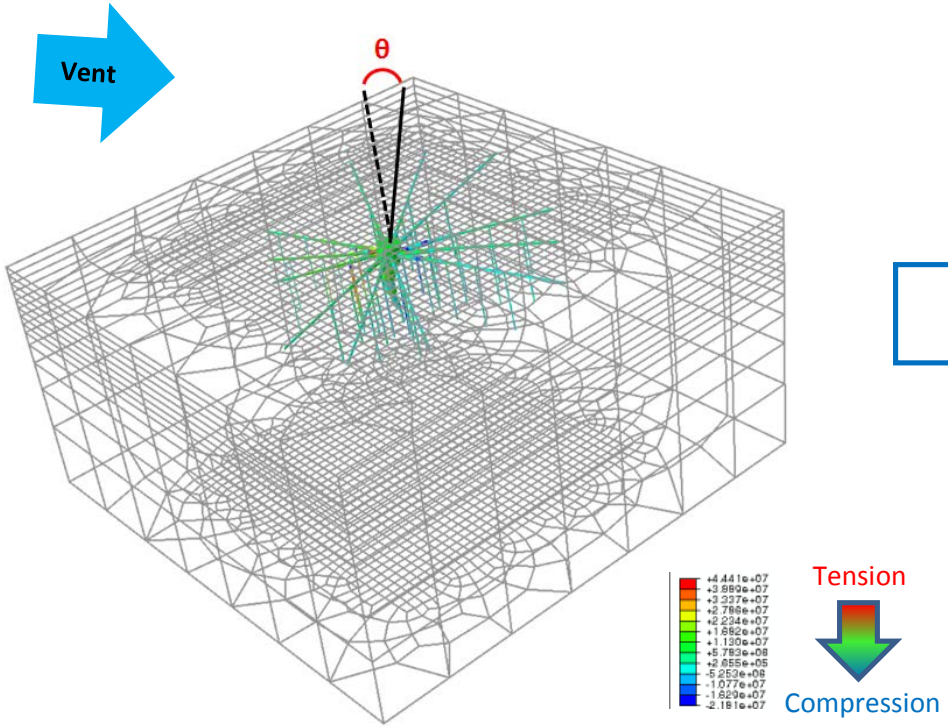
- Simuler ces modifications architecturales avec le modèle de croissance racinaire (Root Typ) :
  - Modification du modèle
  - Simulation à différentes profondeurs ➔ Nappe et alios entre 60 et 100 cm



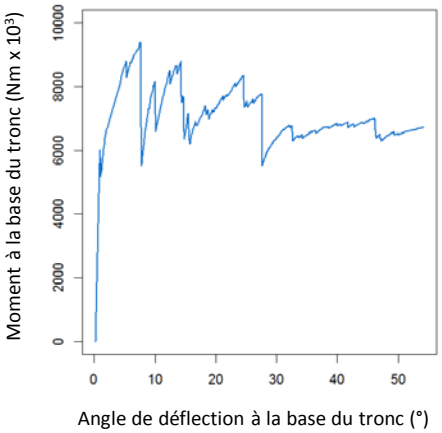
Perspectives : modèle biomécanique

- Quantifier le gain/perte de résistance au déracinement selon les contraintes du sol

➔ Treuillage virtuel en utilisant les structures racinaires simulées par le modèle Root Typ



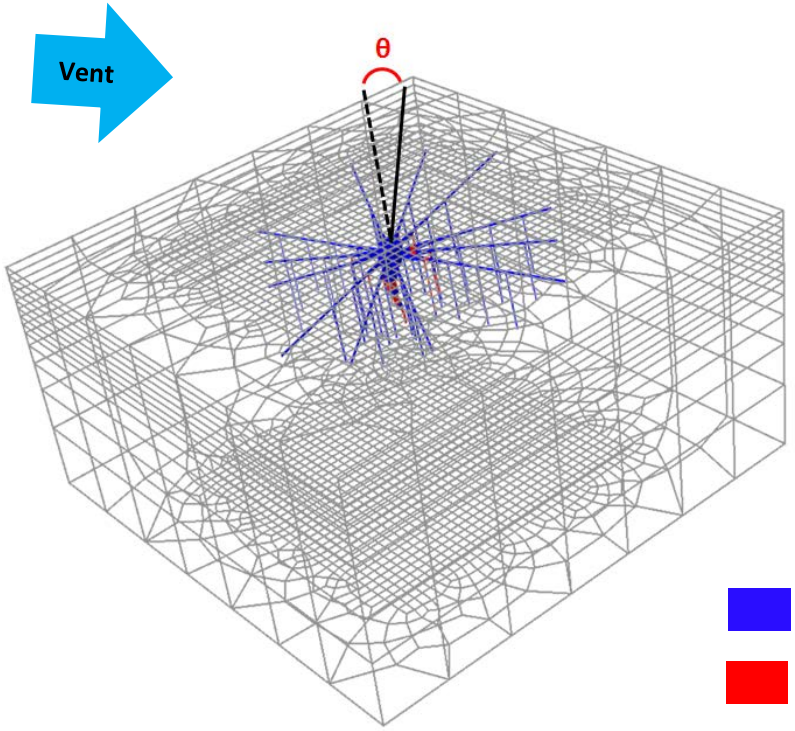
$$M = F \cdot L \cdot \cos\theta$$



Perspectives : modèle biomécanique

- Quantifier le gain/perte de résistance au déracinement selon les contraintes du sol

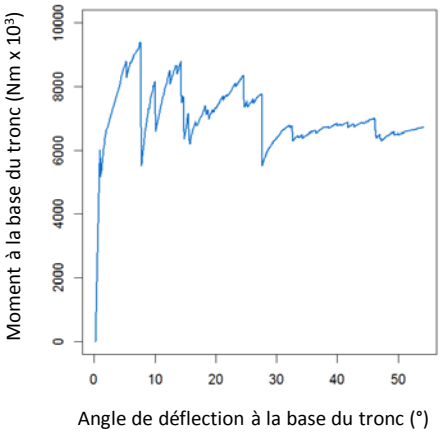
➔ Treuillage virtuel en utilisant les structures racinaires simulées par le modèle Root Typ



= Racine intacte

= Racine endommagée

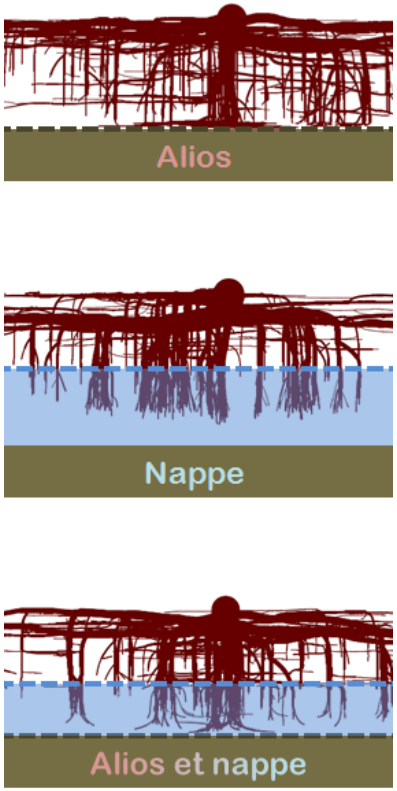
$$M = F \cdot L \cdot \cos\theta$$

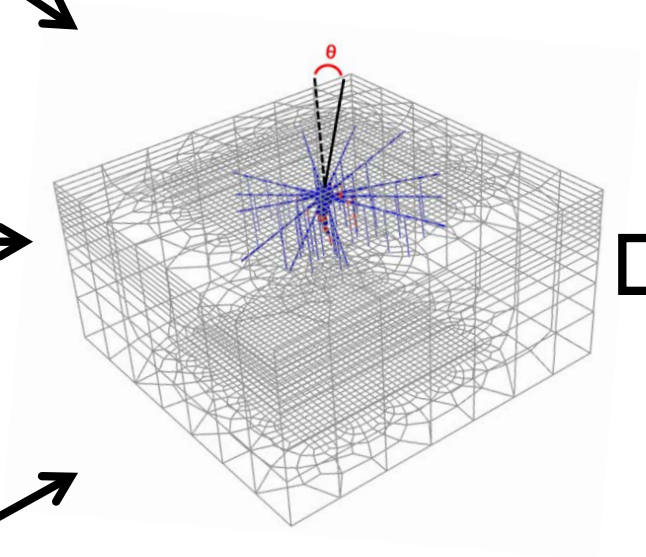


Perspectives : modèle biomécanique

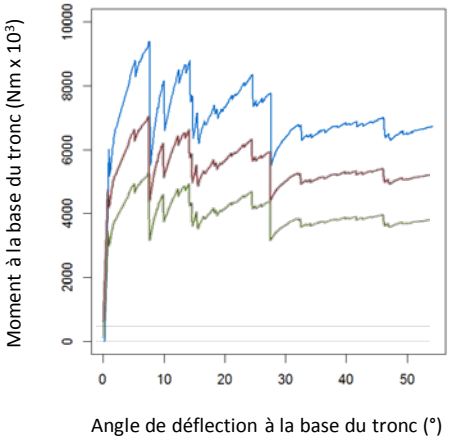
- Quantifier le gain/perte de résistance au déracinement selon les contraintes du sol

➔ Comparaison des courbes de réponses pour différents types de sol





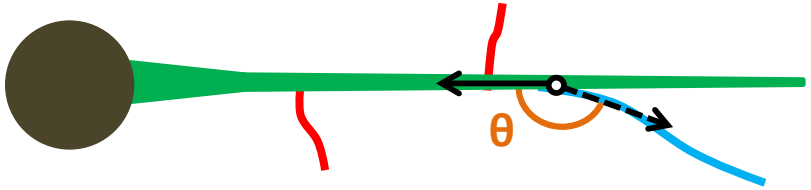
$$M = F \cdot L \cdot \cos\theta$$



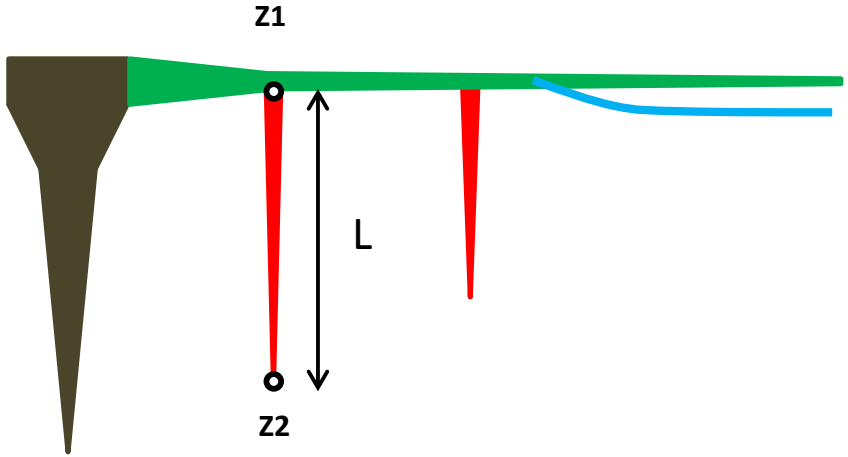
Merci de votre attention

Merci à Ming Yang, Didier Garrigou et Raphaël Ségura

Financement:
- L'IDEX
- L'Université de Bordeaux
- LabexCOTE (ANR-10-LABX-45)



-Géotropisme des racines = (Z2-Z1)/Longueur



Méthodologie

Evaluation du modèle

Base de données :
- Semis
- Lande mésophile
- 0 à 50 ans
- Absence de données dynamique (croissance axiale initiale…)
- Absence de certains stades de développement
- Conservation de données pour la validation du modèle

Root Typ (Pagès et al., 2004)

Représenter la mise en place de l'architecture du système racinaire au cours du temps

Sol :
- *Couches homogènes*
- *4 paramètres :*
  - *Contrainte de croissance*
  - *Contrainte mécanique*
  - *Intensité de contrainte*
  - *Contrainte ramification*

Croissance racinaire :
- *Types racinaires*
- *15 paramètres :*
  - Croissance axiale et radiale
  - Ramification
  - Géométrie
  - Décès et abscission

Analyse de sensibilité

Simulation avec Root Typ pour des stades de développement différents

Acclimatation

Sol et vent dominant

- Ou, quand et comment
- Travail bibliographique
- Travail exploratoire

- **Définir des paramètres et/ou des fonctions mathématiques modélisant ces processus**

RootAnchor (Yang et al., 2014)

Représenter le comportement mécanique du système racinaire

Maquettes simplifiées issues de la base de données

Système racinaire simulé depuis Root Typ

Maquettes simplifiées issues de Root Typ

Racines :
Lois de comportement mécaniques

Paramètres des lois

Implémenter ovalisation

Sol:
Propriétés géométriques

Lois de comportement mécaniques

Paramètres des lois

Simulation avec RootAnchor pour des systèmes racinaires d'âge croissant plus ou moins acclimatés