



HAL
open science

L'arbre et son enracinement

Frederic F. Danjon, Thierry Fourcaud

► **To cite this version:**

Frederic F. Danjon, Thierry Fourcaud. L'arbre et son enracinement. Innovations Agronomiques, 2009, 6, pp.17-37. hal-02664520

HAL Id: hal-02664520

<https://hal.inrae.fr/hal-02664520>

Submitted on 31 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

L'arbre et son enracinement

F. Danjon¹, T. Fourcaud²

1 : Inra Bordeaux

2 : Cirad, UMR AMAP, Montpellier

Correspondance : fred@pierroton.inra.fr

Résumé

Ce chapitre propose un état des connaissances concernant l'ancrage et le système racinaire des arbres forestiers, avec pour principal exemple le pin maritime dans les sols landais. La qualité de l'ancrage dépend des propriétés du système racinaire de l'espèce (architecture et propriétés mécaniques du bois), du mode d'installation, du sol. Le système racinaire a une forte capacité d'adaptation aux stimuli mécaniques engendrés par des sollicitations extérieures comme le vent par exemple. Chaque type de racine a un rôle particulier dans l'ancrage qui est fonction de son positionnement par rapport au vent dominant.

Le pin maritime jeune a un système racinaire pivotant, le pin âgé a un système à pivots multiples, types d'enracinement les plus stables en sol sableux. D'un point de vue mécanique, le pivot unique portant des racines traçantes peut-être comparé à un pieu haubané dans le sol, alors que le système à pivots multiples constitue une cage emprisonnant une grande masse de sol, également haubanée par la partie distale des racines traçantes portant des pivots secondaires. Cette cage délimite un volume sol-racine qui peut peser plusieurs tonnes et qui constitue donc un facteur important de l'ancrage. Le pin maritime jeune est moins stable s'il n'a pas un pivot épais, long et vertical. Le pin maritime émet peu de racines obliques, en outre il ne fourche pas spontanément et ne régénère pas de racines sur les parties déjà formées. En conséquence, si à 10 ans, l'arbre n'a pas constitué une couronne homogène de racines traçantes, il aura un ancrage racinaire moins performant au stade adulte avec une cage incomplète. En effet, sans racines traçantes il ne peut se former de pivots secondaires. Le pin maritime s'adapte fortement et efficacement à la profondeur de sol disponible et au vent dominant. Cette adaptation renforce la stabilité car, en régime Atlantique, les tempêtes soufflent en général dans la même direction que les vents dominants (O'Cinnéide 1975). La sélection naturelle semble avoir conféré aux provenances françaises de l'ouest et de Corse la capacité à développer une architecture racinaire assurant une meilleure stabilité de l'arbre, ce qui ne serait pas le cas pour les provenances espagnoles et nord africaines.

Le pin maritime a donc la potentialité de développer un système racinaire lui assurant une bonne stabilité relative dans l'ensemble des sols landais, il est en revanche très sensible à tout ce qui peut perturber ce développement, en particulier toutes les opérations sylvicoles d'installation. Et il porte des aiguilles en hiver.

Mots-clés : système racinaire, stabilité, mécanique de l'ancrage, tempête, pin maritime, sylviculture

Abstract

This chapter is a review on anchorage and root systems of forest trees, with a focus on *Pinus pinaster* growing in the sandy spodosols of the Landes forest, south-west France. The reliability of the anchorage of a tree depends upon the intrinsic characteristics of the root system of the species (architecture and wood properties), of the way the seedling develop its root system and on soil characteristics. Root systems adapt largely and selectively to mechanical stimuli induced by wind forces. Each root element has a specific role on tree anchorage, which depends also from its position relative to the dominant wind

and/or slope.

Pinus pinaster saplings have generally a taproot system. Older *P. pinaster* trees grow a multiple taproots system, which are the most stable root system types in sandy soils. From the mechanical point of view, a taproot system is similar to a pole guyed by the shallow lateral roots. The multiple taproots system can be seen as a cage trapping a large mass of soil and guyed by the distal part of surface roots. This cage can weight several tons and is a major component of tree anchorage, especially for large individuals. *P. pinaster* saplings are more stable if they have a vertical, deep and thick taproot and lateral roots homogeneously distributed within the shallow soil layer.

Usually, *P. pinaster* develops a very small amount of oblique and horizontal roots at intermediate depth. Roots do not fork spontaneously, and new roots do not appear on older parts of the root system. As a consequence, when a 10-years-old tree has a heterogeneous circular distribution of shallow horizontal roots, it is not able to generate sinkers in sectors without shallow roots. Consequently, the cage of the adult tree can be incomplete, which decreases its anchorage efficiency. *P. pinaster* adapts largely and efficiently to the available soil depth and to the dominant wind. The latter adaptation improves wind firmness, because in Atlantique weather regimes, the direction of storms is generally the same than the direction of dominant winds (O'Cinnéide 1975). *P. pinaster* provenances from the French Atlantic coast or from Corsica have the potential to develop a root system architecture providing a good anchorage in sandy spodosols. It may be a natural selection for stability. Conversely, the root architecture of Spanish and north-African provenances seems less efficient for anchorage.

P. pinaster can potentially develop a root system providing a good relative stability in all soils of the Landes forest. However, the anchorage of this species can be heavily and durably altered by all factors which can perturb its development, particularly all regeneration procedures. And it bears needles in winter.

Keywords: tree root system, stability, mechanics of anchorage, storm, *Pinus pinaster*, stand management

Introduction

Lors d'une tempête, la partie aérienne de l'arbre est soumise à des forces aérodynamiques (forces de traînée). Une partie de l'énergie est absorbée par le mouvement de l'arbre et l'autre partie est transmise au sol via la souche et le système racinaire. Les processus qui conduisent au déracinement d'un arbre sont très complexes. Ils dépendent de l'architecture du système racinaire, des propriétés mécaniques des racines (en particulier leur résistance à la tension et à la flexion) et du sol, du profil pédologique, de la distribution des racines des autres végétaux présents sur le site et de l'état hydrique du sol, les sols étant souvent détrempés au moment de la tempête. La nature et l'état du sol sont particulièrement déterminants pour l'ancrage racinaire, avec des différences importantes par exemple entre des sols argileux et des sols sableux, ou encore entre des sols secs et des sols saturés. Il est donc important d'aborder l'ancrage racinaire vis-à-vis de ces facteurs.

L'ancrage racinaire est une des composantes importantes de la stabilité de l'arbre. Une défaillance de cet ancrage peut causer des chablis ou un pivotement irréversible de l'arbre qui peut avoir des conséquences à long terme sur la forme de la tige et la qualité du bois produit. D'un autre côté, un ancrage trop rigide ne peut absorber suffisamment d'énergie et peut ainsi engendrer la casse du tronc (volis).

Ce texte présente un état des connaissances sur les systèmes racinaires des arbres (en particulier chez le Pin maritime) et leur rôle dans l'ancrage des arbres. Le pin maritime sur podzol landais est le type de peuplement forestier pour lesquels l'architecture du système racinaire est la mieux connue,

mondialement. C'est sur cette essence qu'ont été mises au point les techniques de mesure et d'analyse de l'architecture racinaire statiques les plus performantes actuellement disponibles (collaboration INRA-Bordeaux - AMAP Montpellier & PIAF Clermont-Ferrand, cf. Danjon et Reubens, 2008). Le Pin maritime a aussi fait l'objet de nombreuses études en biomécanique de l'arbre (Dupuy, 2003 ; Dupuy, 2005a & b). Suite à la tempête de 1999 des systèmes racinaires de 12 arbres intacts et 12 arbres chablis d'un peuplement de 50 ans ont été numérisés en 3D (150 000 points de mesure - Danjon et al., 2005), ce qui a permis d'étudier *in silico* leurs caractéristiques architecturales et de mieux comprendre les déterminants de la stabilité d'arbres adultes.

Les techniques d'étude

La compréhension de l'ancrage s'appuie sur plusieurs techniques d'étude :

- inventaires de dégâts après tempête avec caractérisation du sol, mesure des dimensions des arbres et des plaques sol-racines (e. g. Lebourgeois et Jabiol, 2002 ; Cucchi et Bert, 2003),
- essais de treillage statique du tronc avec mesure en continu des forces appliquées puis examen du système racinaire (e. g. Coutts, 1983 ; Cucchi et al., 2005 ; Meredieu et al., 2009). Notons que la plupart des tests de treillage, sauf Cucchi, Stokes et coll., ont été réalisés sans tenir compte de la direction du vent dominant qui a pourtant un effet important sur l'architecture racinaire,
- mesure plus ou moins détaillée de l'architecture des systèmes racinaires (e. g. Coutts, 1983 ; Auberlinder, 1984 ; Danjon et al., 2008 ; Danjon et Reubens, 2008),
- analyses numériques (2D et 3D) de l'ancrage racinaire intégrant une représentation simulée ou mesurée de l'architecture des racines et les propriétés du sol.

Les parties aériennes des plantes ont souvent une croissance assez régulière et sont influencées par la compétition pour la lumière. Les systèmes racinaires ont une croissance beaucoup plus opportuniste, réagissant à des stimuli. Le sol est un milieu beaucoup plus hétérogène que l'air, avec des barrières impénétrables pour les racines telles les anciennes souches, les souches des arbres en place, des horizons pédologiques compactés ou indurés. C'est pour cela que la mesure en 3D des systèmes racinaires entiers (Henderson, 1983) est indispensable pour bien les caractériser. Notons qu'il n'y a aucune relation entre la projection du houppier au sol et la distribution spatiale du système racinaire, à part en terme de dimension. La croissance du système racinaire correspond à un apport supplémentaire de volume dans le sol, le niveau du sol s'élève donc quelque peu autour la souche quand les systèmes racinaires poussent.

Les systèmes racinaires font depuis longtemps l'objet de mesures simples du type pourcentage de biomasse racinaire dans la biomasse totale, profondeur maximale d'enracinement, notation de déformations après plantation, évaluation de la répartition circulaire des traçantes, évaluation qualitative avec dessins (e. g. Köstler et al., 1968). L'évaluation quantitative de l'architecture a commencé avec la mesure des surfaces de section de racines à leur insertion sur la souche (CSA = "cross sectional area" en anglais - Coutts, 1983), mesure qui donne en général une bonne idée du volume de l'arborescence de racines en aval du point de mesure.

Mises au point il y a 10 ans, les mesures d'architecture du système racinaire en 3 dimensions ont permis de quantifier cette architecture. Il s'agit de mesures manuelles avec boussole, inclinomètre, régle et pied à coulisse + logiciel de saisie (e. g. Dupuy et al., 2003a & b), ou de mesures semi-automatiques avec numériseur 3D à champ magnétique basse fréquence (Polhemus, Colchester, Vermont), logiciel de pilotage pour l'architecture végétale (Donès et al., 2006) et pied à coulisse (Danjon et al., 1999a). Ces mesures peuvent être faites en laissant l'arbre dans le sol et en le déterrants progressivement (Danjon et al., 2008), ce qui est très long, ou en arrachant le système racinaire avec

une pelleuse après évacuation préalable d'une partie de la terre avec une lance à air comprimé. Ces lances sont des outils précieux car elles n'abîment pas les racines, ne nécessitent pas d'apporter de l'eau ni d'évacuer les boues. Il faut toujours solidement marquer les informations de positionnement (nord, horizontale, niveau du sol), avant l'arrachage. Pour la mesure, le système racinaire doit alors être repositionné avec des méthodes dépendant de la taille de l'arbre. Au printemps 2009, 45 + 71 systèmes racinaires de pin maritime âgés respectivement de 2 et 6 ans ont été numérisés par Danjon et ses collaborateurs en fixant la souche par des sangles ou une mâchoire en bois à une planche fichée obliquement dans le sol. Les racines traçantes ont été attachées dans leur position la plus probable par des pinces accrochées à des lanières en chambre à air de vélo elles-mêmes fixées sur des cordes tendues à 4 niveaux autour d'arbres. La numérisation 3D fournit des volumes de racines, qui peuvent être convertis en biomasse si l'on a mesuré par exemple la variation de densité en fonction du diamètre de racine.

Les systèmes non invasifs de type radar sol permettent de détecter les racines dans certaines conditions particulières (e.g. Dannoura et al., 2009 ; Butnor et al., 2001). Ils ont fait l'objet d'une quinzaine d'articles méthodologiques, mais jamais d'une utilisation opérationnelle, car pour des raisons techniques ils ne permettent pas de reconstituer précisément l'architecture racinaire (voir Danjon et Reubens, 2008). L'architecture peut aussi être mesurée sur des systèmes racinaires arrachés avec des systèmes de numérisation 3D laser, mais ils ne peuvent décrire des structures complexes où certaines racines en masquent d'autres. En outre, ils fournissent des gros fichiers de voxels avec absence/présence de racines, mais ne permettent pas une reconstitution automatique en segments et axes, nécessaire pour l'analyse architecturale (Danjon et Reubens, 2008).

L'analyse architecturale consiste à classer les racines par type (p. ex. pivot, pivots secondaires, traçantes, racines profondes voir figure 1). Puis d'évaluer les caractéristiques quantitatives de chaque type, et éventuellement de construire une maquette de croissance des racines (Jourdan et Rey, 1997 ; Pagès et al., 2004). Elle permet par exemple de détecter de façon détaillée les adaptations du système racinaire à des stimuli comme le vent dominant ou la pente (Danjon et al., 2005).

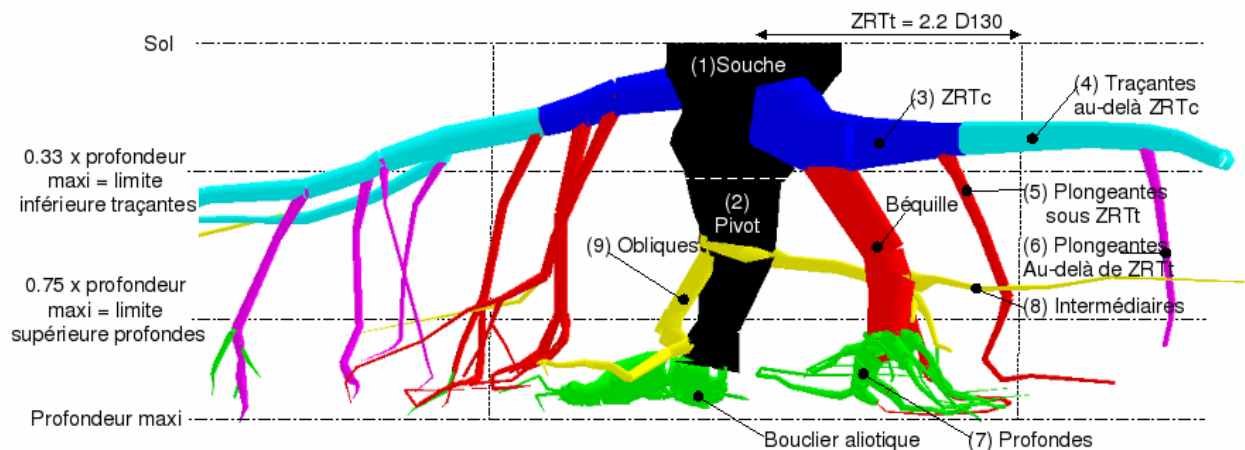


Figure 1 : Les compartiments racinaires chez le pin maritime adulte tel que définis par analyse architecturale par Danjon et al. (2005)

Les méthodes d'étude du type carottage ou monolithes sont utilisées pour mesurer la longueur ou la biomasse des racines fines (diamètre < 2 mm e. g. Bakker et al. 2006) mais ne conviennent pas à l'étude des racines de structure qui sont justement structurées en systèmes racinaires. Les racines fines sont en général distribuées de façon homogène dans une parcelle monospécifique, avec une variation forte en fonction de la profondeur. Le rôle mécanique de ces racines est de contribuer à la cohésion du

sol en tension, en fournissant un renforcement additionnel. L'absorption d'eau et d'éléments minéraux n'a lieu que sur l'extrémité des racines fines et sur les poils absorbants qui assurent aussi l'interface avec les mycorhizes ou portent les nodules. Notons que, hormis pour les peuplements jeunes, le stock de biomasse de racines fines dans un peuplement forestier à un moment donné (e. g. Bakker et al. 2006) est faible par rapport au stock de racines de structure. En revanche, il y a peu d'élagage naturel dans les racines de structure, mais un fort renouvellement dans les racines fines, ces dernières sont donc un important puits de carbone.

La structure des systèmes racinaires

Un des facteurs primordiaux conditionnant la stabilité est la répartition de biomasse entre les parties aériennes et souterraines, mais pour un rapport de biomasse donnée, l'ancrage varie fortement en fonction de l'architecture des racines.

L'architecture des systèmes racinaires est d'abord déterminée par la génétique. Elle s'exprime pleinement dans des sols non limitants (Köstler et al., 1968) et passe par des stades de développement particuliers, caractérisés par une morphologie plus ou moins typique (Atger et Edelin, 1994). A la germination, les espèces d'arbres des régions tempérées émettent d'abord un pivot vertical, qui produit ensuite un nombre important de racines latérales, en particulier dans les horizons de surface (Atger, 1992 ; Weber et Matteck, 2005). Chez le pin maritime, le pivot peut dépasser 10 cm en quelques jours, et sa longueur dépasse largement la hauteur du plant en fin de saison (Maugé, 1987). Au fur et à mesure de sa croissance, ce pivot émet une grande quantité de racines latérales, mais seules les racines situées sur les 15 premiers centimètres forment de longues traçantes (Burbridge, 1936).

Le tronc est en premier lieu tenu par la souche, qui est le prolongement du tronc dans le sol. La souche porte une couronne de racines traçantes, elle est souvent prolongée par le pivot et porte éventuellement des racines obliques. La ZRT ("Zone of Rapid Taper" = zone de défilement rapide – Eis, 1972) est la partie des racines traçantes proche de la souche, elle est renforcée mécaniquement par une croissance en diamètre plus importante et par une croissance ovale dans le sens de la hauteur, mimant une poutre en T ou en I. Les traçantes peuvent porter des pivots secondaires, verticaux. Différents autres types de racines sont portés par ces racines principales. Les systèmes racinaires d'arbres peuvent être classés en fonction de trois critères (Atger, 1992 ; Atger et Edelin, 1995 ; Drénou, 2003) :

- (1) le % de racines obliques, Köstler et al. (1968) proposent ainsi un classement en quatre catégories : traçant, pivotant, à pivots multiples et en coeur. Les systèmes racinaires en coeur émettent des racines dans toutes les directions vers le bas, ce sont les seuls à avoir une forte proportion de racines obliques. Le type de système racinaire évolue avec l'âge, le pin maritime en sol sableux, passe ainsi d'un système pivotant à un système à pivots multiples et ce d'autant plus rapidement que la profondeur de sol disponible est faible (Danjon et al., 2005). Le hêtre et le chêne ont souvent un système racinaire de type coeur, une fois le stade juvénile passé (Köstler et al., 1968). Le pin maritime développe très peu de racines obliques quelque soit l'âge ou le mode d'installation. Même les plants obtenus par bouturage, ce qui perturbe complètement la morphogenèse, ont un système racinaire typique du pin maritime, hormis pour le nombre de racines latérales émises par la souche, qui sont deux fois moins nombreuses que pour les semis (Khuder et al., 2007).
- (2) l'importance des fourchaisons spontanées (Atger, 1992 ; Atger et Edelin, 1995). Ne sont pas comptées les fourches traumatiques causées par exemple par le travail du sol ou des insectes herbivores. L'épicéa de Sitka produit ainsi systématiquement des fourchaisons sur les racines traçantes (Henderson et al., 1983), ce qui peut réduire la résistance à la flexion sous le vent, mais peut compenser une mauvaise répartition circulaire des racines. Le pin maritime ne

produit probablement que des fourches traumatiques. Se forme alors un bourrelet de cicatrisation et la racine réitère en émettant quelques nouvelles racines qui se développent en éventail. La nature du sol peut aussi induire des fourches. Burbridge (1936) a ainsi observé de nombreuses fourches sur les pivots dans l'horizon de sable jaune grossier situé en dessous de 50 cm. Sur podzol landais, on relève en moyenne 3 fourches par arbre à 5 ans et 50 fourches par arbre à 50 ans (Danjon et al., 1999, 2005).

- (3) la possibilité de générer de nouvelles racines sur la souche et les racines existantes ou "développement retardé" (Atger, 1994). Ceci permet de ré-explorer des zones déjà explorées par les premières racines et permet à l'arbre de régénérer des racines nécessaires à sa stabilité là où pour une raison ou une autre il n'en a pas. Le platane, le douglas, les chênes pédonculés et sessiles, hêtre, platane, épicéa de Sitka ont la capacité de former de nouvelles arborescences de racines à partir de la souche ou sur les racines déjà formées depuis des dizaines d'années (Atger, 1994; Drénou, 2003).

Les systèmes racinaires, tel le pin maritime, qui n'ont pas de racines obliques, sans fourchaison et sans développement retardé sont les plus sensibles à une perturbation de la morphogenèse (Atger et Edelin, 1994 ; Edelin et Atger, 1994) : si leur couronne de racines traçantes est altérée ou n'est pas symétrique, elle le restera. En conséquence, la distribution des pivots sera elle aussi dissymétrique, car ceux-ci se développent sur les racines traçantes (Coutts et al., 1990 ; Danjon et al., 2005).

La souche est l'équivalent du tronc pour les racines : elle a un rôle très particulier d'articulation entre le tronc et les racines et de collecte de la sève brute. Elle représente souvent une part importante de la biomasse. Nicoll et al. (1995) ont montré que des clones d'épicéa de sitka ne différaient pas par leur pourcentage de biomasse alloué aux racines, mais en revanche, certains clones avaient développé une souche plus importante au détriment des racines de structure, ce qui conférait une moindre stabilité à ces derniers. Chez le pin maritime à 5 ans, le système racinaire hors souche représente 25% du volume tronc entier + souches + racines, et la souche 7,5% (Danjon et al., 1999b). Pour des pins de 50 ans ces proportions sont respectivement de 16% et 3,5% (Danjon et al., 2005). Le pourcentage de racines dans le volume tronc + souche + racines était inférieur de 12% chez des arbres chablis fin 1999, dans un peuplement de 50 ans avec 10% de chablis (Danjon et al., 2005).

Les racines les plus proches du collet forment ce que Lyford (1984) a défini comme le "système racinaire central" qui contient la majeure partie de la biomasse souterraine. Ce compartiment est en général formé par la souche, le pivot, la ZRT et les pivots qu'elle porte ainsi que les racines obliques, à profondeur intermédiaire et profonde, dans cette zone. Les racines forment ainsi une espèce de cage qui emprisonne le sol. Il y a en général une faible biomasse de racines profondes en-dehors du système racinaire central.

Les systèmes racinaires se distinguent aussi par leur capacité à faire des anastomoses (greffes) internes ou avec d'autres arbres. De nombreuses anastomoses, très solides, ont été observées sur des pins maritimes âgés (Danjon et al., 2005) mais aussi sur des arbres jeunes. Ces anastomoses se produisent simplement quand deux racines se croisent. Pour des pins de 50 ans, elles comptent en moyenne pour 4% de la surface externe des racines, plus si on compte les anastomoses qui se produisent au contact de l'horizon induré (bouclier aliotique) et les soudures entre ZRT et souche (Danjon et al., 2005). Des anastomoses entre arbres ont aussi été observées (B. Lung, comm. pers.), elles permettent à une partie des systèmes racinaires des arbres abattus en éclaircie de survivre et de s'intégrer au système racinaire d'arbres voisins. Ce phénomène n'est pas visible sur le pin comme il l'est sur d'autres espèces dont la souche produit un bourrelet de cicatrisation, car la souche de pin pourrit en surface. Cela n'a probablement qu'une faible incidence directe sur la stabilité compte tenu de l'espacement entre arbres, mais peut être un bon vecteur pour les pourridiés.

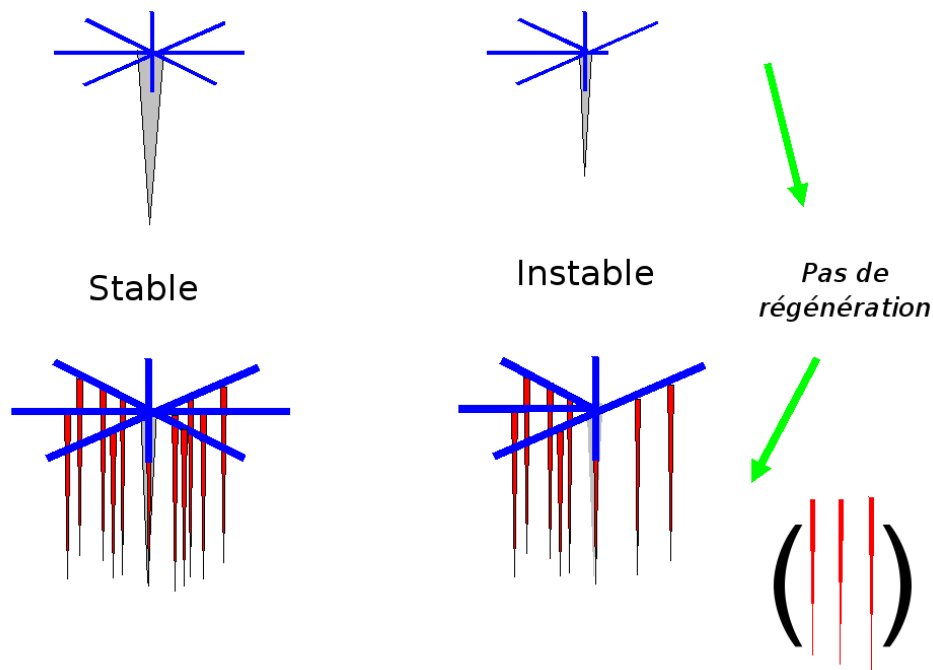


Figure 2 : Système racinaire du type pieux haubanné dans jeune (haut) et de type cage haubannée âgé (bas), sans racines obliques et ne générant pas de racines par développement retardé : si la répartition circulaire des racines de l'arbre jeune n'est pas homogène, la cage sera incomplète et donc instable.

La mécanique du système racinaire

Lors d'une tempête, les racines sont soumises à des forces (exprimées en Newton [N]) et des moments¹ de forces (exprimés en Newton mètre [N.m]) dont la nature (traction/tension, compression, flexion, torsion et/ou cisaillement) et l'intensité dépendent de leur position au sein du système racinaire (Fourcaud et al., 2008). A chaque type de sollicitation correspond un champ de contraintes, i. e. des forces internes appliquées en chaque point matériel et exprimées en force par unité de surface [N/m²] ou encore en Pascal (1Pa=1N/m²). Pour déterminer le risque de casse d'une racine, on peut soit comparer sa résistance (force ou moment de force nécessaire pour rompre une racine) à la force effectivement appliquée, soit comparer en tout point matériel la contrainte à la rupture (définie comme la contrainte maximale supportée par le matériau avant sa rupture) à la contrainte effective. La contrainte à la rupture est une caractéristique du matériau constitutif (ici le bois racinaire), alors que la résistance d'une racine (qui correspond à une force ou à un moment de force) est une caractéristique de structure qui dépend à la fois de sa géométrie (surface de la section droite, moment d'inertie) et de la contrainte de rupture du matériau qui la constitue.

La contrainte est le principal critère utilisé pour déterminer le risque de casse d'une racine et par effet domino la ruine complète de l'ancrage racinaire. La contrainte à la rupture, qui est une propriété intrinsèque du matériau, ne devrait pas a priori dépendre des dimensions de la racine. Il a été cependant montré qu'en dessous de 10 mm de diamètre, les racines les plus fines résistent proportionnellement mieux en traction, c'est-à-dire que leur contrainte à la rupture est significativement plus élevées, car elles sont moins riches en lignine, et donc plus riches en cellulose (Genet et al.,

¹ Le moment d'une force en un point donné est égal à cette force multipliée par le « bras de levier », c'est-à-dire la distance qui sépare cette force du point considéré.

2005). D'autre part le bois est moins résistant en flexion qu'en tension.

Nous décrivons ci-dessous la forme théorique du champ des contraintes longitudinales (c'est-à-dire dans la direction de l'axe de la racine) qui s'exerce sur une section droite d'une racine pour différents types de sollicitations :

- (1) la traction/tension ou la compression : en une position donnée le long de la racine, la contrainte longitudinale de traction (par convention positive) ou de compression (par convention négative) σ en tout point de la section est égale à la force de traction ou de compression F appliquée dans la direction de l'axe de la tige divisée par la surface S de la section droite, soit $\sigma = F/S$. Cette contrainte est donc constante en tout point de cette section et diminue proportionnellement à l'inverse du diamètre au carré ($1/D^2$) si les sections droites sont circulaires.
- (2) la flexion : pour une racine en flexion, la contrainte longitudinale exercée en un point donné d'une section droite est proportionnelle au moment M de la force appliquée, à la position y de ce point par rapport à l'axe neutre de la racine, et inversement proportionnelle au moment d'inertie I de la section droite, soit $\sigma = My/I$. La contrainte est maximale positive sur la surface extérieure à la courbure (face tendue), minimale négative sur la surface intérieure (face comprimée), et nulle au centre de la racine ($y=0$). Compte tenu de la plus faible résistance des fibres de bois en compression, la rupture d'une racine en flexion est initiée sur la partie inférieure à la courbure. Pour une section droite circulaire, le moment d'inertie I est proportionnel au diamètre D à la puissance 4 ($I = \pi D^4/64$), ce qui implique qu'un accroissement du diamètre diminue fortement les niveaux de contraintes, en particulier les valeurs extrêmes situées à la périphérie de la section ($y=D/2$).
- (3) la torsion : la torsion induit une contrainte de cisaillement qui s'applique dans la direction tangente aux cernes de croissance. En un point donné d'une section droite, cette contrainte de cisaillement τ est proportionnelle au moment de torsion M_t , à la distance r du point à l'axe neutre de la racine, et inversement proportionnelle au moment quadratique polaire I_o ($\tau = M_t r / I_o$). La résistance en torsion des racines est faible compte tenu que les fibres de bois peuvent s'écarter facilement l'une de l'autre dans les directions qui leur sont perpendiculaires.

La résistance de l'ancrage racinaire dépend également des propriétés mécaniques du sol qui est un matériau complexe. Le sol se déforme très vite de façon irréversible (plasticité) et ses propriétés mécaniques dépendent de sa nature (sable, limon, argile), mais également de son humidité. La résistance au cisaillement de l'argile augmente lorsqu'on le tasse. En revanche, cette résistance diminue lorsque l'humidité augmente. La cohésion des grains dans un sable humide peut être supérieure à la cohésion d'un sable sec qui est proche de zéro. Lors d'un chablis, plusieurs modes de ruptures peuvent apparaître en cascade. Les racines peuvent se rompre (voir les modes de rupture ci-dessus) ou s'arracher du sol (glissement de l'interface sol-racine) alors que le sol, soumis aux efforts transmis par les racines, peut se déformer fortement (cisaillement ou ouverture). Les racines et le sol étant fortement liés, leurs modes de rupture ne peuvent être dissociés. Les déformations et ruptures des racines provoquent des déformations et ruptures du sol, et réciproquement. Ces interactions complexes sont décrites dans Fourcaud et al. (2008) ou encore dans Dupuy et al. (2005a & b ; 2007).

Dans un sol sableux, le meilleur ancrage d'arbres de faible dimension est obtenu par un pivot long, droit, vertical et rigide, haubanné par des racines traçantes, disposées en couronne régulière et renforcées dans la ZRT (Ennos, 1993). C'est le modèle du pieu haubanné dans le sol (Figure 3). Sous l'effet d'une tempête, l'effort est transmis dans la souche qui peut casser si elle n'est pas assez renforcée. Dans le sable, l'axe de rotation de la plaque racinaire se déplace sous le vent (Fourcaud et al., 2008) lors du basculement de l'arbre. Le pivot est alors sollicité de façon combinée en flexion-

tension. Il est souvent plié au milieu avec un affaissement des fibres de bois sur la face située sous le vent (flambement). L'haubannage du pivot par des racines profondes permet d'abaisser le centre de rotation de la plaque racinaire vers le bas, donc de renforcer l'ancrage (Figure 4 *in* Ennos, 1993). Cet effet est visible en particulier dans les sols sableux (Fourcaud et al., 2008). Les racines traçantes situées au vent sont sollicitées en traction. Leur résistance à l'arrachement augmente avec le taux de ramification (Dupuy et al., 2005a). D'autre part, à section totale égale, un réseau de racines fines et nombreuses est plus résistant en tension que quelques grosses racines (Genet et al., 2008). La ZRT quand à elle est sollicitée en traction-flexion dans la direction au vent et flexion-compression sous le vent avec formation d'une charnière qui correspond à la position finale de l'axe de rotation de la plaque. La stabilité de l'arbre est améliorée d'autant plus que cette charnière est située loin de la souche, augmentant le bras de levier relatif au poids de la plaque. La partie des racines traçantes située à plus de 2 m du collet ne contribue pratiquement pas à l'ancrage. Si les racines de surface ne sont pas disposées régulièrement, leur mise en tension ne s'effectue pas de façon simultanée et elles cassent les unes après les autres dans un phénomène de cascade (Stokes et al., 2004).

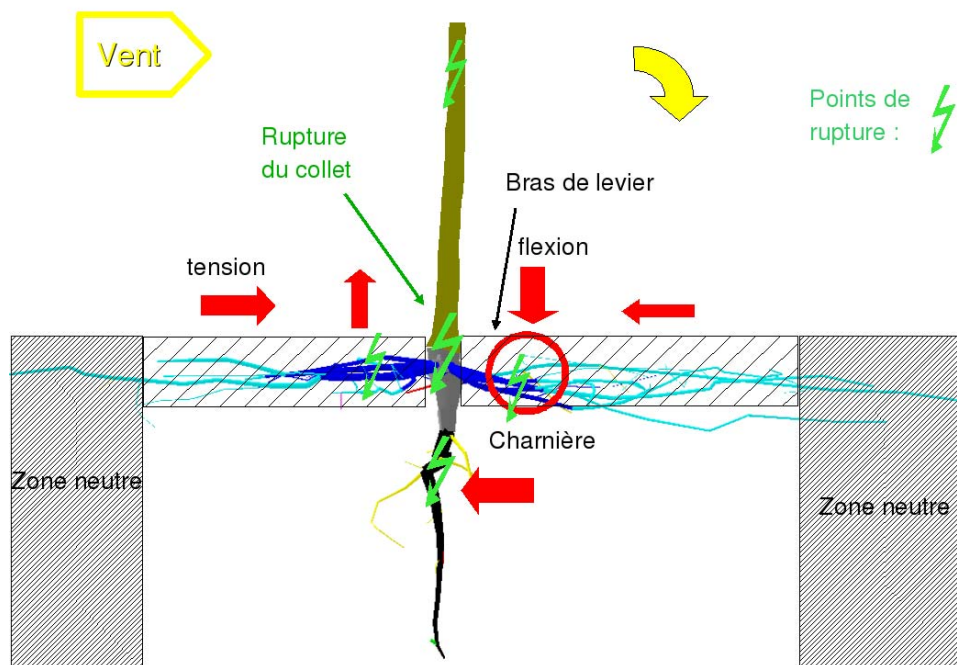


Figure 3 : Schéma illustrant les forces subies sous l'effet du vent par un arbre jeune ayant un système racinaire de type pieux haubanné en sol sableux.

Au fur et à mesure de la croissance du système racinaire, les sollicitations subies par une section qui est par exemple située à 40 cm du centre de la souche évoluent : zone neutre sur le jeune semis, puis zone sollicitée en tension, puis zone de cisaillement en limite du système racinaire central, puis élément de la ZRT pour enfin finir englobée dans la souche (Weber et Matteck, 2005). Le dessin de ses cernes annuels reflète l'historique des sollicitations mécaniques auxquelles elle est soumise (Weber et Matteck, 2005).

Lorsque l'arbre grandit, on change d'échelle (Figure 4) : la taille du pivot devient nécessairement faible par rapport aux parties aériennes qu'il porte et ce d'autant plus que l'épaisseur de sol disponible pour les racines est réduite. C'est alors le poids de sol que peut emprisonner le système racinaire central qui devient déterminant pour la stabilité car la masse de la plaque sol-racine augmente avec la puissance 4 du diamètre du tronc (Ennos, 1993). Ceci correspond au modèle du parasol tenu par une cage de

racines emprisonnant le sol, haubanné par la partie distale des racines traçantes et coulée dans le sol avoisinant. Cette cage s'appuie, le cas échéant, sur un horizon induré, tel l'aliôs (horizon pédologique d'accumulation dans les sols sableux, sable cimenté par de la matière organique ou du fer).

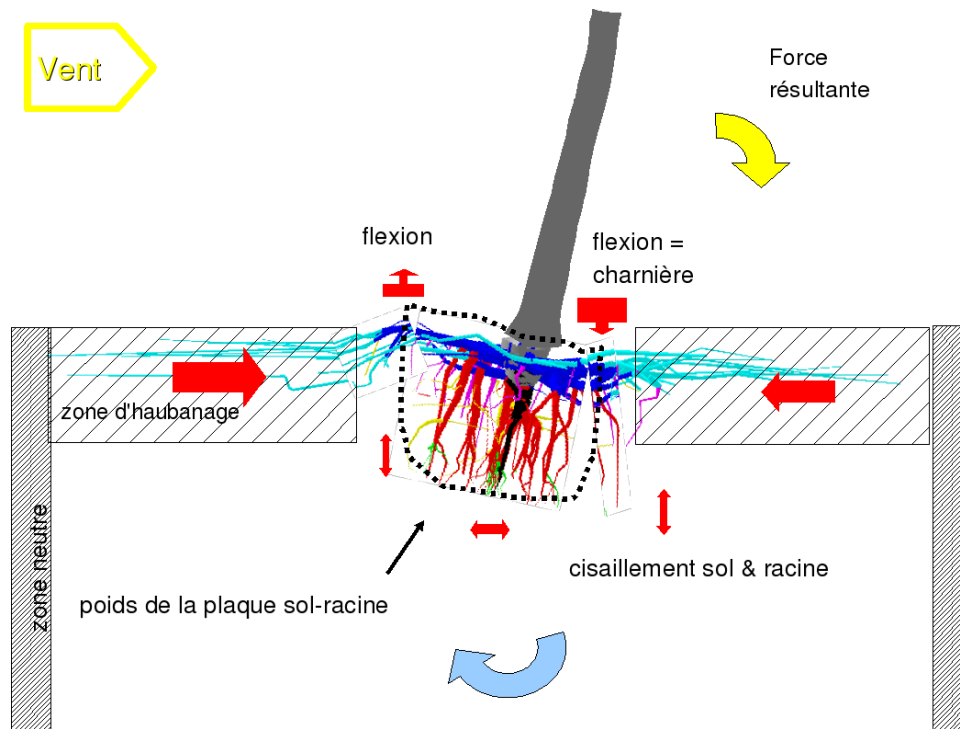


Figure 4 : Schéma illustrant les forces subies sous l'effet du vent par un arbre de grande taille ayant un système racinaire de type cage haubannée en sol sableux.

Lors d'une tempête, les facteurs suivants déterminent la performance de l'ancrage :

- (1) la résistance au cisaillement de la plaque sol-racine potentielle avec le sol alentour. C'est la rigidité du système racinaire central qui permet à la plaque de rester solidaire du sol alentour. C'est en particulier un renforcement de la ZRT et des pivots qui permet d'assurer cette rigidité (Stokes, 2002). La délimitation de la plaque est en général le premier phénomène qui conduit au chablis. Le rayon de la plaque est de l'ordre de 5 fois le diamètre du tronc à hauteur de poitrine (DHP) pour les petits arbres et de l'ordre de 2,5 fois le DHP pour les gros arbres (Weber et Matteck, 2005). La résistance à la traction du sol est de l'ordre de 1000 fois inférieure à celle des racines. Elle diminue quand la teneur en eau augmente et augmente grâce à l'armement du sol par les racines fines des arbres et du sous-bois.
- (2) le poids de la plaque sol-racine est déterminant et dépend de la capacité du système racinaire central à retenir le sol : volume d'enveloppe, compacité du volume, ramification des racines à l'intérieur, cohésion du sol, armature par les racines fines...
- (3) la résistance en flexion des racines traçantes sous le vent qui sont poussées dans le sol. Il se forme alors une charnière, axe de rotation autour duquel l'arbre peut tourner et tomber. La partie distale de ces racines traçantes est tirée vers l'arbre. Si cette charnière casse au moment du chablis, la plaque racinaire pivote au fond du trou et le tronc se couche sur le sol, si elle se plie sans casser, la plaque reste accrochée au bord du trou et le tronc est au-dessus du sol (Stokes, 2002 ; Weber et Matteck, 2005).
- (4) la résistance en tension des racines traçantes au vent : les racines sont tirées dans la direction

du vent, elles se soulèvent près de la souche. Comme il est dit plus haut, la contribution des racines en tension est d'autant plus grande que les racines fines sont nombreuses (taux de ramification élevé).

- (5) La résistance en torsion des racines traçantes perpendiculaires au vent qui contribue peu à l'ancrage ;

La partie périphérique du système racinaire, située au-delà d'une distance au collet de l'ordre d'une dizaine de fois le DHP a un rôle mécanique réduit pour l'arbre (Weber et Matteck, 2005). Elle sert principalement à absorber l'eau et les éléments minéraux, à assurer les symbioses et contribue à l'armature du sol au niveau des arbres voisins.

Les contributions respectives de ces différents facteurs dans l'ancrage ont été déterminées par treillage en coupant successivement certaines racines. Mais ces expérimentations ont été réalisées dans des conditions très particulières, épicéa de sitka sur sol très superficiel (Coutts 1986) ou mélèze (Crook et Ennos, 1996) sur sol sec sans formation de plaque sol-racine (Danjon et al., 2005). Il est donc difficile d'attribuer une contribution à chaque élément d'autant qu'ils interviennent successivement en cas de chablis.

Un horizon induré ou rocheux a un rôle ambigu : il limite la profondeur d'enracinement, mais offre un très bon support aux racines. Ainsi, dans les podzols landais, des pins maritimes qui ont poussé sur un horizon induré à 1 m de profondeur moyenne ont mieux résisté au chablis que les arbres dont l'enracinement était limité en moyenne à 1,15 m de profondeur par la nappe phréatique. Mais lorsque la profondeur de sol disponible est inférieure à 0,8 m, seuls des arbres ayant développé un système racinaire spécialement renforcé ont résisté au chablis (Danjon et al., 2005).

Une modélisation du comportement du complexe sol-racines par la méthode des éléments finis (Dupuy et al, 2005a & b ; Dupuy, 2003a ; Fourcaud et al., 2008) a permis de détailler la chronologie du chablis. Lorsqu'un vent fort fait pencher le tronc, les racines au vent se soulèvent du sol, qui est en détente. Dans l'argile, les racines sous le vent s'y enfouissent, le sol est comprimé. Cet effet est moins marqué dans un sol sableux qui est incompressible. Trois zones s'individualisent alors (Danjon et al., 2009) :

- (1) Le bulbe ou plaque sol-racine qui suit le mouvement de l'arbre en se désolidarisant du sol ;
- (2) La zone de rupture, bande enveloppant le bulbe, où des phénomènes de rupture complexes touchant à la fois les racines, le sol, les grosses racines se produisent.
- (3) La zone non perturbée où l'ensemble du sol et des racines ne bouge pas.

La zone de rupture se forme en périphérie du système racinaire central, où la résistance des racines est plus faible, alors que plus loin, la quantité de sol à cisailier est trop importante. La plaque racinaire est en général dissymétrique. Cette dissymétrie peut provenir de l'anisotropie du système racinaire et/ou des propriétés mécaniques du sol (cf. Fourcaud et al., 2008). Par exemple un sol sableux est incompressible mais n'offre pas de résistance en traction. C'est ainsi que l'on peut marcher sur du sable sans s'enfoncer mais qu'il est possible de l'empoigner sans difficulté (Danjon et al., 2009). Comme le sol résiste fortement sous le vent, la rupture se fait plus près du collet, rompant de grosses racines. Inversement, du côté du vent, elle se fait plus loin et rompt les petites racines en traction. Dans un sol plus résistant, la plaque sol-racine sera plus petite, les racines rompront plus près du collet. Chez le pin maritime sur podzol, les plaques sol-racine sont toujours plus grandes dans le vent que sous le vent lorsqu'ils sont treillés dans le sens du vent dominant (Cucchi et al., 2004).

Dupuy et al. (2005b) ont montré par simulation que les systèmes racinaires de type "coeur" ou "à pivots multiples" résistaient mieux au chablis que les systèmes superficiels ou de type "arête de poisson" (pivot avec racines horizontales insérées tout le long). Les systèmes pivotants, tel le pin maritime, résistent mieux en sol sableux où la profondeur d'enracinement est déterminante. Les systèmes de type coeur, tel le chêne résistent mieux en sol argileux. Chez les pins maritimes adultes, c'est au début du

chablis que l'arbre oppose une résistance maximale au déracinement, quand le bulbe se désolidarise du sol environnant pour former la plaque sol-racine (Cucchi et al., 2004).

La rectitude du tronc peut être un bon indicateur de la stabilité d'un arbre. Dans un peuplement de pin maritime de 5 ans, les arbres les plus droits avaient aussi la plus forte profondeur d'enracinement et un gros pivot (Danjon et al., 1999b). De même, dans une expérimentation de treuillage de pins d'une vingtaine d'années, les arbres les plus droits étaient mieux ancrés (Cucchi et al., 2004). Dans un peuplement âgé, ce sont les arbres ayant une mauvaise rectitude basale qui sont tombés (Danjon et al., 2005). Dans la provenance landaise de pin maritime, à dix ans, la génétique contrôle environ un quart de la variabilité de la rectitude du tronc (Danjon et al., 1994). Chez le pin maritime, l'inclinaison basale produit une ovalité du tronc avec un ventre et la formation de bois de compression du côté de la inclinaison qui est aussi en général celle des vents dominants.

La plasticité des systèmes racinaires

Les systèmes racinaires réagissent fortement aux propriétés du sol et aux stimuli mécaniques. Certaines poches de sol très fertiles ou fournissant une bonne alimentation hydrique induisent une prolifération de racines. Mais ce sont surtout les horizons impénétrables, indurés, tassés, engorgés, les souches, les cailloux ou les roches qui modèlent les systèmes racinaires (Köstler et al., 1968). Les forêts européennes sont la plupart du temps installées sur des sols difficiles, peu profonds (Lebourgeois et Jabiol, 2002). L'épicéa commun est par exemple très sensible à l'hydromorphie et à l'anoxie qui limitent donc sa profondeur d'enracinement (Puhe, 2003). Le chêne sessile peut présenter un enracinement dense et puissant dans des argiles lourdes jusqu'à 1,7 m de profondeur, il prospecte parfaitement les horizons engorgés (Lebourgeois et Jabiol, 2002 ; Lebourgeois et al., 2004). Sur ces mêmes stations, le hêtre, qui ne supporte pas l'anoxie ou les horizons compactés, a un enracinement beaucoup plus superficiel. A l'inverse, le hêtre et le pin maritime compensent la faible profondeur du sol par la mise en place d'un système d'autant plus traçant que les contraintes sont fortes ce que ne peut faire le chêne sessile (Lebourgeois et al., 2004 ; Danjon et al., 2005). Le pin réduit la taille de son pivot, au profit des racines traçantes, pivots secondaires et racines proches de la limite inférieure d'enracinement (Cucchi et al., 2004 ; Danjon et al., 2005). En dune et lande sèche, le pin maritime a un système racinaire dominé par le pivot jusqu'à l'âge de 10 ans-20 ans, il développe ensuite des pivots secondaires. Dans des stations à nappe permanente très superficielle, le pin développe un système racinaire central traçant qui peut atteindre 5 m de rayon.

Un renforcement sélectif du système racinaire dans et sous le vent dominant a été observé chez de nombreuses essences, et ceci en fonction des propriétés du sol (notamment la géométrie), mais dans le cadre des possibilités morphogénétiques de l'espèce définies plus haut (Khuder et al., 2007). Il s'agit de procurer à l'arbre le meilleur ancrage pour une allocation de ressources donnée. Chez l'épicéa de Sitka à 46 ans, l'accroissement annuel en diamètre dans la ZRT est lié à l'intensité du vent de l'année correspondante et au type de stress mécanique subi en chaque point par la racine (Nicoll et Dunn, 1999). Les racines placées du côté des vents dominants sont plus nombreuses et ramifiées tandis que les racines sous le vent sont épaisses et peu nombreuses. Ceci a été observé sur des jeunes plants d'épicéa (Stokes et al., 1997) et de chêne (Tamasi et al., 2005). D'autre part, on observe souvent une ovalisation des sections droite des grosses racines, sections qui peuvent également prendre la forme d'un T ou d'un I (Nicoll et Ray, 1996 ; Coutts et al., 1999). Cette modification de la géométrie augmente fortement la rigidité à la flexion dans la direction du grand axe qui se trouve généralement dans le plan vertical. Les formes de sections en T ou en I sont bien connues des ingénieurs pour conférer aux poutres une rigidité à la flexion maximale pour une quantité minimum de matériau utilisé. Cette anisotropie de la croissance secondaire correspond donc à un processus d'acclimatation (ou d'adaptation) biomécanique de l'arbre soumis au vent. Chez le pin maritime, le renforcement de l'accroissement radial dans la ZRT est plutôt localisé sur la face inférieure de la racine, les racines se

rapprochent d'une forme en T inversé (Stokes et Guitard, 1997).

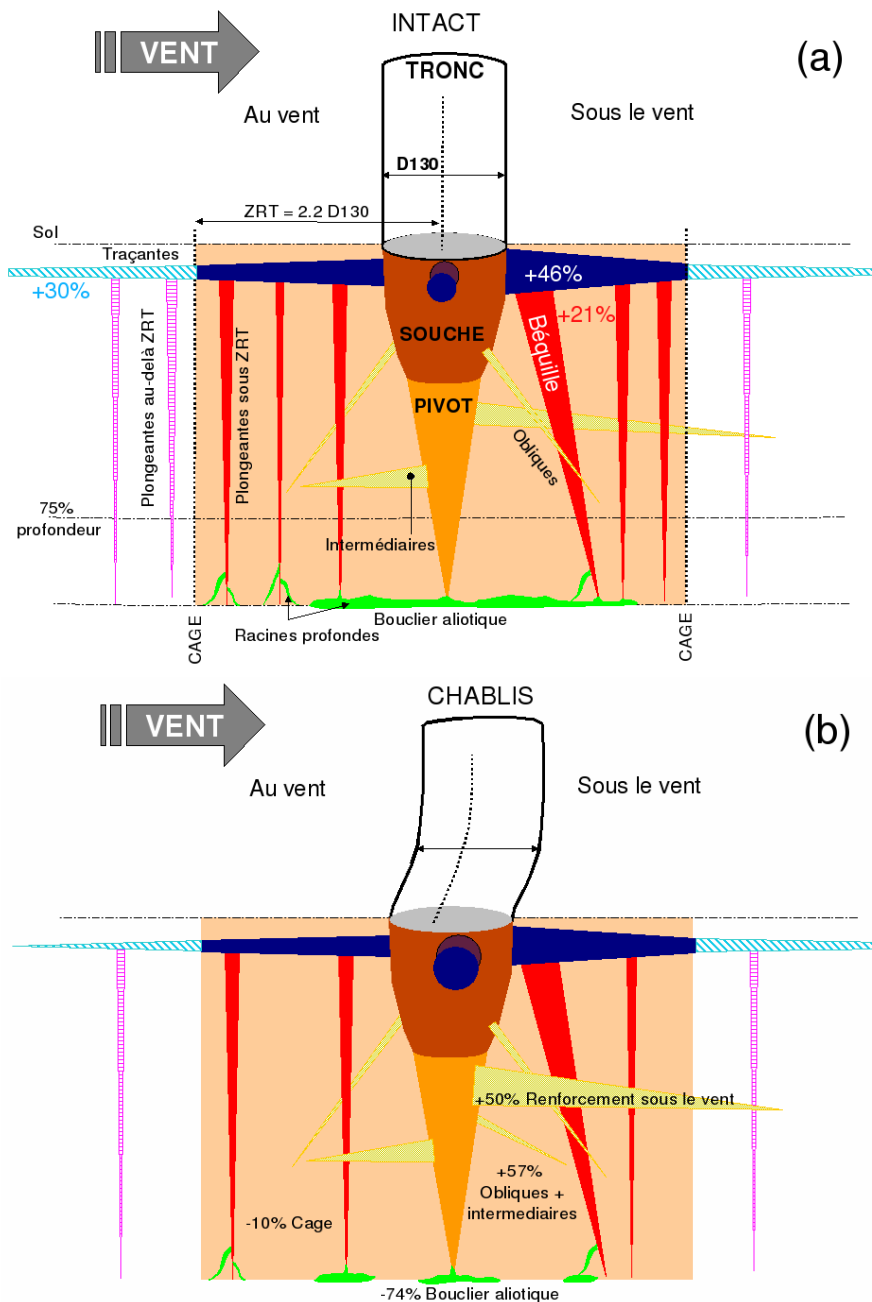


Figure 5 : Schéma d'un système racinaire de pin maritime avant coupe rase en podzol de landes mésophile, (a) arbre intact, (b) arbre chablis pendant la tempête de 1999 (d'après Danjon et al. 2005)

Ainsi, le pin maritime renforce sélectivement son système racinaire, en fonction du type de contraintes subies par les différents compartiments de racines, mais sans développer de racines obliques (Danjon et al., 2009). Dès l'âge de 7 ans, le volume des traçantes et des pivots est renforcé d'environ 25% dans le vent et surtout sous le vent. En ce qui concerne la longueur de racines, seuls les racines traçantes au-delà de la ZRT et les pivots présentent un renforcement d'environ 30% sous le vent (Khuder et al., 2007). Pour des pins maritimes de 50 ans, les volumes de la ZRT et des pivots qui en sont issus sont renforcés respectivement de 46% et de 21% sous le vent. Les racines qui haubant la cage sont renforcées de 30% dans le vent. Il y a un tiers de plus de racines et de longueur de racines dans le quartier sous le vent (Danjon et al., 2005). Dans 90% des arbres, la plus grosse racine traçante est située dans le quartier sous le vent, elle porte en général un fort pivot qui joue le rôle de trépied (2,5% du volume de racines) et est souvent terminée par un bouclier de racines anastomosées au contact de

l'horizon induré (Danjon et al., 2005). Pour les arbres de 7 ans comme pour les arbres de 50 ans, 60% du volume racinaire est localisé dans les quartiers au vent et dans le vent.

Il n'y a pas, à la base, de stratégies d'évitement des racines d'un arbre par rapport à celle des autres arbres, comme c'est le cas pour les parties aériennes. En revanche, les souches et les grosses racines, vivantes ou mortes, sont des obstacles impénétrables. Nous n'avons pu observer de compétition spatiale entre racines chez le pin maritime, dans un peuplement âgé de 6 ans, planté à 80 x 80 cm. Les racines traçantes forment un tissu très dense de racines entrecroisées à environ 5 cm de profondeur. En revanche, la compétition aérienne peut avoir un fort effet sur l'ancrage. Ainsi, la stabilité des pins du massif landais a sûrement été améliorée lors du passage de la technique du semis en bande à celle du semis ou de la plantation en ligne : en effet, avec la première technique, les troncs se courbent vers l'extérieur de la ligne pour éviter les houppiers voisins ce qui diminue la stabilité (Danjon et al., 2005).

Dans les régénérations, les modes d'installation jouent bien sûr sur la stabilité. Certaines méthodes d'élevage produisent des déformations racinaires ou enroulements dans les contenants ou au moment de la plantation, quand l'habillage n'est pas assez sévère. Une synthèse a été réalisée par Girard (2003). Une plantation de pins maritimes en mottes de tourbe présentait un bon développement des traçantes à 5 ans, sans déformations ou enroulement. En revanche, moins de 20% des arbres avaient régénéré un large pivot, les arbres restants ayant des racines verticales et profondes relativement peu développées et leur tronc n'était pas droit (Danjon et al., 1999b).

Une technique de phénotypage haut débit de l'architecture du système racinaire a été mise au point par Danjon et al. (2008) sur 1 200 arbres de provenances et familles de pin maritime : les provenances atlantiques françaises et dans une moindre mesure les provenances corses, ont le système racinaire le mieux adapté au vent, il y aurait donc une sélection naturelle pour la stabilité face au vent. Ces données sont encore en cours d'analyse, les résultats ne seront définitifs qu'une fois publiés dans une revue. Suite à la tempête de janvier 2009, 71 arbres de ce même dispositif, ont été arrachés, leur système racinaire a été numérisé en 3D, ce qui permettra de connaître plus en détail la variabilité génétique de l'architecture racinaire.

Le pin maritime dans les sols landais

Les sols landais, des podzols, sont des sols très pauvres en éléments minéraux. La teneur en phosphore n'atteint que 10% de la moyenne mondiale des sols forestiers (Achat et al. 2009), qui sont eux même moins fertiles que les sols agricoles. Le phosphore est en général l'élément le plus limitant et il est présent en quantité très variable. Ce sol ne retient pas bien l'eau, et peut présenter des profils pédologiques extrêmement variables d'un mètre à l'autre sur le plateau landais (Figure 6), en relation avec la microtopographie : en surface, le sol paraît plat, mais il présente en fait des micro-crêtes d'une quarantaine de cm de haut, avec une couche d'aliôs impénétrable à environ 40 cm de profondeur. Dans les micro creux, il n'y a pas d'aliôs, mais c'est la nappe phréatique qui arrête les racines à environ 1 m de profondeur. Et l'hiver, ces micro-creux peuvent être inondés pendant des périodes assez longues, provoquant des mortalités de racines de pin. Entre ces crêtes et ces creux, le profil pédologique présente un aliôs plus profond (60 cm à 1 m), et moins dur. L'aliôs est de dureté, de composition, d'épaisseur et de profondeur très variable et n'est donc pas présent sous forme d'une nappe continue, mais sous forme d'espèces de loupes plus ou moins fragmentées. Il a été observé que des pins poussaient au bord d'une loupe ou pouvait passer les racines dans des espèces de failles. Lorsqu'elles atteignent l'aliôs, les racines plongeantes des pins adoptent une croissance horizontale, suivant l'aliôs. Les pins âgés forment ainsi de véritables "boucliers aliôtiques" composés de dizaines de racines soudées. Sur 24 arbres d'un peuplement adulte, le volume des boucliers racinaires représentait 30% du volume de racines hors souche pour un arbre (Danjon et al. 2005). Un feutrage dense de racines fines d'un ou deux centimètres d'épaisseur se développe aussi à la surface de l'aliôs sous le système racinaire central. Dans les micro-creux, les pivots se terminent par des pinceaux de fines racines qui

meurent et se renouvellent (Nicoll et Coutts, 1998 ; Danjon et al., 2005). Sur un échantillon réduit d'arbres, il n'a pu être observé de relation entre croissance, résistance au chablis d'une part et profondeur de l'altos d'autre part.

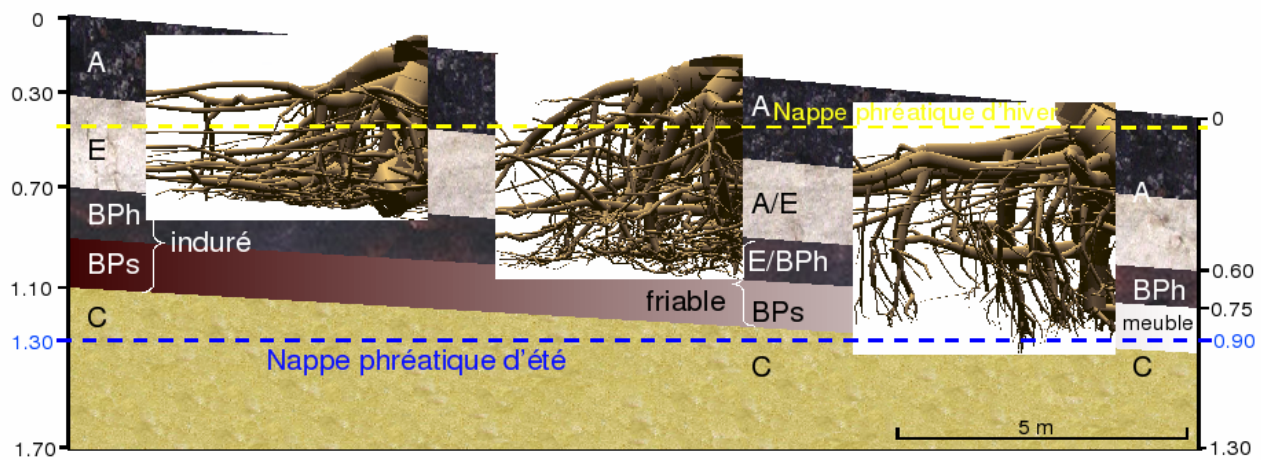


Figure 6 : Schéma d'une micro toposéquence de podzol en lande mésophile ou humide. Toposéquence d'après Righi et Wilbert (1984) et Jolivet et al. (2003). L'échelle de profondeur (en m) est indiquée latéralement. En surimposé : demi systèmes racinaires de pin maritime avant coupe rase typiques des micro-crêtes (à gauche), des profils intermédiaires (au milieu) et des micro-creux (à droite) Même échelle horizontale et verticale pour les systèmes racinaires et la profondeur du sol (m) (d'après Danjon et al., 2005).

Au jeune âge, le pin maritime émet un pivot renforcé vertical, haubanné sous le collet par de longues racines traçantes à environ 5 cm de profondeur. Ces racines ont tendance à suivre la surface du sol et peuvent probablement faire plus d'un mètre de long à la fin de la première année et plus de 2 m à la fin de la deuxième. Elles sont peu ramifiées. Dès la deuxième année, peut-être même durant la première, des pivots secondaires verticaux sont émis sur les racines traçantes. Avec l'âge, (1) le pivot perd de son importance relative au profit des plongeantes et des racines profondes, (2) la ZRT se renforce au détriment de la partie distale des traçantes, (3) la proportion des obliques et des horizontales à profondeur intermédiaire reste constante. La proportion en volume hors souche de ces trois grandes catégories de racines reste relativement constante, environ : 43% pour toutes les traçantes, 43% pour tout ce qui plonge et 14% pour les autres racines. Cette répartition est sans doute plus le résultat d'une optimisation de la résistance mécanique que d'une optimisation pour le transport d'eau et d'éléments minéraux. Les racines de structure ont bien sûr comme fonction de porter les racines fines et d'acheminer au tronc les éléments nutritifs et l'eau. Elles ont aussi un rôle de stockage de sucres. Ces dernières fonctions ont cependant été peu étudiées chez le pin maritime et la relation entre racines fines et racines de structure est peu connue.

Les pourridiés (Fomès, Armillaires) diminuent aussi fortement la stabilité des arbres, mais leur effet n'a pas été quantifié. Les très vieux pins tombent souvent à cause d'un pourrissement très étendu à la base du tronc ou dans la souche. Landis et Evans (1974) ont par exemple constaté que dans des peuplements de peupliers trembles touchés par une tempête, 5% des arbres intacts et 86% des arbres chablis étaient infectés par le fomès (voir Colin et al., 2009).

Nous avons vu que, de par les propriétés de son système racinaire, le pin maritime est très bien adapté aux sols du massif forestier landais. Il est cependant très sensible à tout ce qui peut perturber la morphogenèse du système racinaire. D'où l'importance de la phase d'installation des arbres, des techniques de préparation du sol pour les semis ou les plantations. Les jeunes peuplements ont été peu touchés par la tempête de 1999, ils ont apparemment subi de nombreux dégâts à la tempête de 2009.

Recommandations pratiques

C'est en quelque sorte le schéma de développement non perturbé qui semble assurer la meilleure stabilité au pin maritime (Danjon et al., 2005). C'est un sol bien plat, sans micro-relief, sans microtopographie, sans dérayure ni obstacle qui permet le meilleur ancrage. Les pratiques sylvicoles devraient donc gêner au minimum ce développement, bien que l'architecture du pin soit relativement stable. Le plus gros défaut dans les plantations provient probablement des divers phénomènes d'enroulement et déformations des racines le long des parois des conteneurs ou dépassant de la motte à la plantation, ou des nécroses. Car une racine qui dépasse de la motte peut être pliée dans une direction qui n'est alors pas sa direction d'origine. La forme de la motte (ronde ou carrée) a peut-être aussi une influence sur la distribution des racines en cas de pliure, de même que la procédure de plantation en elle-même. Il ne faudrait donc planter que des semis dont on a inhibé la croissance des racines hors de la motte, ou dont on a coupé toutes les racines visibles au ras de la motte. Un enroulement réduit la stabilité de l'arbre jeune, car une racine qui n'est pas rectiligne n'est pas un hauban efficace. En revanche, ce défaut est gommé lorsque l'arbre grandit et que la racine est englobée dans la souche. Le deuxième inconvénient des enroulements est d'induire potentiellement une hétérogénéité dans la couronne de racine (Figure 2), qui, chez le pin maritime ne sera pas compensée quand l'arbre grandit. Des vides d'air entre le sol et la motte sont aussi susceptibles d'entraver un bon développement de la couronne de racines traçantes. Il faudrait aussi qu'une fois planté, le tronc et le pivot du plant soient les plus verticaux possibles.

Les tassements du sol par les engins, les semelles de labour et les ornières sont aussi à éviter (Schütz, 2000). Les techniques de désherbage coupant les racines superficielles réduisent aussi la performance de l'ancrage, en particulier sous le vent. Une partie de la biomasse racinaire est perdue et, chez le pin maritime, la racine repart en fourche multiple, moins efficace en flexion. Ainsi, il ne faudrait pas que les lames du rouleau landais entament le sol, mais qu'elles restent cantonnées dans la litière. Nous l'avons vu, une grande partie des racines des arbres est localisée très près de la surface du sol. Une destruction du sous-bois permet en général de diminuer la compétition pour l'eau et les éléments minéraux, mais elle a aussi pour conséquence de diminuer l'armement du sol par les racines fines des herbacées, qui contribuent à l'ancrage. Une fertilisation favorisant les parties aériennes (fertilisation azotée) est à déconseiller. Il faut tuteurer le moins possible les arbres car cela empêche le tronc et le système racinaire de s'adapter au vent (Coutant et al., 2008). Une mise à distance régulière des arbres diminue la compétition aérienne, donc les dissymétries de houppier et les sinuosités du tronc. Elle permet aussi d'éviter qu'un arbre voisin n'entrave la croissance des racines par la présence de sa souche et de grosses racines. Lors de régénérations, il faudrait installer les nouveaux arbres le plus loin possible des anciennes souches. L'arrachage des souches pour les utiliser comme combustible devrait en principe être favorable à la stabilité du peuplement suivant.

Les racines fines re-colonisent rapidement un sol perturbé : deux ans après l'élagage des racines (jusqu'à 0,6 m de profondeur, à 5 m des arbres) d'un brise vent de pins maritimes âgé de 16 ans sur sable profond, la distribution des racines fines de pins dans le champ adjacent était la même que avant l'élagage (Sudmeyer et al., 2004).

Il est fort probable qu'un pin qui n'est pas droit à la base se soit incliné à cause d'un mauvais enracinement juvénile et/ou d'une micro-station peu propice à l'ancrage (Cucchi et al., 2004 ; Danjon et al., 2005). Comme le pin peut difficilement régénérer un système racinaire stable à partir d'un système racinaire déficient, l'élimination prioritaire en dépressage ou éclaircie des arbres à mauvaise rectitude permet probablement d'augmenter la stabilité du peuplement. Ce sont les quartiers sous le vent proches du tronc et le quartier dans le vent qui sont les plus sensibles à une détérioration des racines (Danjon et al., 2005).

Perspectives

Les déterminants de l'ancrage du pin maritime âgé en lande mésophile ou humide (après 10-15 ans) sont maintenant relativement bien connus (Danjon et al., 2005). Il reste cependant à vérifier les hypothèses avancées par des simulations numériques (Dupuy et al., 2005 a & b, 2007 ; Fourcaud et al., 2008) et à y coupler les connaissances acquises sur le comportement au vent du houppier et du tronc (Sellier et Fourcaud, 2005, 2009 ; Sellier et al., 2006, 2008). Une meilleure compréhension de l'effet des propriétés du sol est aussi nécessaire. En revanche, on connaît moins bien l'effet de tous les facteurs ou opérations qui vont se dérouler entre la germination de la graine et le système racinaire de l'arbre de 5 m de haut. Les déterminants de l'ancrage d'espèces ayant un système racinaire de type "coeur" sont également peu connus.

Pour l'instant, l'installation du système racinaire du pin maritime a surtout été étudiée dans des tests de comparaisons de conteneurs, avec des mesures simples, sur des arbres âgés de 3 à 5 ans (e. g. Auberlinder, 1982). Dans l'avenir, nous suggérons de suivre le développement du système racinaire dès la germination, pour comprendre en fonction de quel facteur s'orientent les méristèmes, comment les racines se régénèrent à la plantation, quels sont les effets d'irrégularités dans le sol, d'une plantation tardive, les mortalités d'ennoyage,... ceci en essayant de reproduire les aléas qui peuvent jaloner la croissance du système racinaire. Il faudrait maintenant acquérir des connaissances sur les mécanismes de mise en place du système racinaire, plutôt que de tester des types d'installation spécifiques.

Par ailleurs, la régénération du massif landais après la récente tempête fera probablement la place à plus de diversité, de variabilité, en particulier en terme d'espèces. Les itinéraires techniques d'installation de semis ou de plantation de pin maritime sont maintenant bien maîtrisés, en tout cas en ce qui concerne la survie et croissance. En revanche, le semis et la plantation d'autres essences ne sont pas pratiqués à la même échelle et avec le même savoir faire. Les conditions pédoclimatiques landaises sont très particulières, avec un sol qui peut être très sec en été, très humide en hiver et une forte concurrence herbacée. Nous suggérons donc que soit étudiée de façon générique et analytique l'installation d'une série d'espèces identifiées pour avoir un bon potentiel sur certains sols landais.

Nous suggérons également d'examiner l'architecture racinaire des variétés nouvelles au sens large, y compris provenances ou croisements inter-provenances de pin avec les techniques de phénotypage haut-débit (Danjon et al., 2008), pour déterminer à l'âge de 4-5 ans leur potentiel de résistance à la tempête.

L'effet du profil pédologique landais, en particulier le rôle de l'altos et de la nappe phréatique sur l'ancrage et l'alimentation en eau et éléments minéraux est mal connu. Une modélisation en éléments finis du sol et du système racinaire permettrait de mieux comprendre le rôle du sol et des opérations de travail du sol.

Remerciements : *Les figures extraites de Danjon et al. (2005) sont reproduites avec l'aimable autorisation du New Phytologist Trust.*

Références bibliographiques

- Achat D.L., Bakker M.R., Augusto L., Saur E., Dousseron L., Morel C., 2009. Evaluation of the phosphorus status of P-deficient podzols in temperate pine stands: combining isotopic dilution and extraction methods. *Biogeochemistry* 92, 183-200.
- Atger C., 1992. Essai sur l'architecture des arbres. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 287 p.
- Atger C., Edelin C., 1994. Premières données sur l'architecture comparée des systèmes racinaires et caulinaires. *Can. J. Bot.* 72, 963-975.

- Atger C., Edelin C., 1995. A case of sympodial branching based on endogenous determinism in root system: *Platanus hybrida* Brot. Acta. Bot. Gallica 142, 23-30.
- Auberlinder V., 1982. De l'instabilité du pin maritime. Annales de Recherche Sylvicoles, A. Fo. Cel, Paris. pp 139-178.
- Bakker M.R., Augusto L., Achat D.L., 2006. Fine root distribution of trees and understory in mature stands of maritime pine (*Pinus pinaster*) on dry and humid sites. Plant Soil 286, 37-51.
- Böhm W., 1979. Methods of studying root systems. Ecological studies n° 33. W. D. Billings, F Golley, O L Lange, J S Olson (Eds.) Springer Verlag, Berlin, 188 p.
- Burbridge N.T., 1936. Root development in *Pinus pinaster* and the seasonal variation of its mycorrhizae Australian Forestry 10, 32-40.
- Butnor J.R., Doolittle J. A., Kress L., Cohen S., Johnsen K.H., 2001. Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. Tree Physiology 21, 1269-1278.
- Colin F., Vinkler I., Riou-Nivert P., Renaud J.P., Hervé J.C., Bock J., Piton B., 2009. Facteurs de risque dans les peuplements forestiers : les leçons des tempêtes des 26 et 27 décembre 1999. In : La forêt face aux tempêtes. Y. Birot, G. Landmann, I. Bonhême, coord. Coll. Synthèses, Quae Ed. Paris. p. 177-228.
- Coutand C., Dupraz C., Jaouen G., Ploquin S., Adam B., 2008. Mechanical stimuli regulate the allocation of biomass in trees: Demonstration with young *Prunus avium* trees. Annals of Botany 101, 1421-1432
- Coutts M.P., 1983. Root architecture and tree stability. Plant Soil 71, 171-188.
- Coutts M.P., 1986. Components of tree stability in Sitka spruce on peaty gley soils. Forestry 59, 173-197.
- Coutts M.P., Nielsen C.C.N., Nicoll B.C., 1999. The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers. Plant and Soil 217, 1-15.
- Coutts M.P., Walker C., Burnand A.C., 1990. Effects of establishment method on root form of lodgepole pine and Sitka spruce and on the production of adventitious roots. Forestry 63, 143-159.
- Crook M., Ennos A., 1996. The anchorage mechanics in deep rooted larch, *Larix europea* x *L. japonica*. Journal of Experimental Botany 47, 1509-1517.
- Cucchi V., Meredieu C., Stokes A., Berthier S., Bert D., Najar M., Denis A., Lastennet R., 2004. Root anchorage of inner and edge trees in stands of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) growing in different podzolic soil conditions. Trees: Structure and Function 18, 460-466.
- Cucchi V., Bert D., 2003. Wind-firmness in *Pinus pinaster* Ait. stands in Southwest France: influence of stand density, fertilisation and breeding in two experimental stands damaged during the 1999 storm. Annals of Forest Science 60, 209-226
- Danjon F., 1994. Heritabilities and genetic correlations for estimated growth curves parameters in maritime pine. Theor. Appl. Genet. 89, 911-921.
- Danjon F., Barker D., Drexhage M., Stokes A., 2008. Using 3D root architecture in models of shallow slope stability. Annals of Botany 101, 1281-1293
- Danjon F., Bert D., Godin C., Trichet P., 1999a. Structural root architecture of 5-year-old *Pinus pinaster* measured by 3D digitising and analysed with AMAPmod. Plant Soil 217, 49-63.
- Danjon F., Drénou C., Dupuy L., Lebourgeois F., 2009. Racines, sol mécanique de l'ancrage de l'arbre et stabilité. In : Y. Birot, G. Landmann, I. Bonhême (Eds.) La forêt face aux tempêtes. Coll. Synthèses, Quae Editions. Paris. pp 155:176.
- Danjon F., Eveno E., Bernier F., Hubert F., Brach J., Garnier-Géré P., Plomion C., 2008. Coarse root architecture and stability in a 5-years-old *Pinus pinaster* provenance x progeny test. Proc. COST E38 meeting, Lisbon, Portugal, 16-20 May 2008, R013
- Danjon F., Fourcaud T., Bert D., 2005. Root architecture and windfirmness of mature *Pinus pinaster* (Ait.). New Phytologist 168, 387-400.

- Danjon F., Reubens B., 2008. Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation. *Plant and Soil* 303, 1-34.
- Danjon F., Sinoquet H., Godin C., Colin F., Drexhage M., 1999b. Characterisation of structural tree root architecture using 3D digitising and AMAPmod software. *Plant Soil* 211, 241-258.
- Donès N., Adam B., Sinoquet H., 2006. PiafDigit – software to drive a Polhemus Fastrak 3 SPACE 3D digitiser and for the acquisition of plant architecture. Version 1.0. UMR PIAF INRA-UBP, Clermont-Ferrand 15 p
- Drénou C., 2003. Typologie et variations de l'enracinement des arbres adultes. *Forêt-Entreprise* 153, 27-33.
- Dupuy L., 2003a. Modélisation de l'ancrage racinaire des arbres forestiers. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux I, 128 p.
- Dupuy L., Drénou C., Fourcaud T., 2003b. Sols, racines et ancrage des arbres forestiers. *Forêt-Entreprise*. 15, 39-43.
- Dupuy L., Fourcaud T., Stokes A., 2005a. A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension. *European Journal of Soil Science* 56, 319-327.
- Dupuy L., Fourcaud T., Stokes A., 2005b. A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. *Plant and Soil* 278, 119–134.
- Edelin C., Atger C., 1994. Stem and root tree architecture: questions for plant biomechanics. *Biomimetics* 2, 253-266.
- Eis S., 1972. Root system morphology of western hemlock, western red cedar, and douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research* 4, 28-38.
- Ennos A.R., 1993. The scaling of root anchorage. *Journal of Theoretical Biology* 161, 61-75.
- Fourcaud T., Ji J.N., Zhang Z.Q., Stokes A., 2008. Understanding the impact of root morphology on overturning mechanisms: a modelling approach. *Annals of Botany* 101, 1267-1280.
- Genet M., Stokes A., Salin F., Mickovski S.B., Fourcaud T., Dumail J., van Beek R., 2005. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. *Plant and Soil* 278, 1-9.
- Girard S., 2003. Le système racinaire des plants forestiers élevés en pépinière. *Forêt-Entreprise* 153, 24-26.
- Henderson R., Ford E.D., Renshaw E., 1983. Morphology of the structural root system of sitka spruce 2. computer simulation of rooting pattern. *Forestry* 56, 137-153.
- Hirano Y., Dannoura M., Aono K., Igarashi T., Ishii M., Yamase K., Makita N., Kanazawa Y., 2009. Limiting factors in the detection of tree roots using ground-penetrating radar. *Plant Soil* 319, 15–24
- Jolivet C., Arrouays D., Lévêque J., Andreux F., Chenu C., 2003. Organic carbon dynamics in soil particle-size separates of sandy spodosols when forest is cleared for maize cropping. *European Journal of Soil Science* 54, 257-268.
- Jourdan C., Rey H., 1997. Modelling and simulation of the architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. I. The model. *Plant Soil* 190, 217–233
- Khuder H., Danjon F., Stokes A., Fourcaud T., 2006. Growth response and root architecture of black locust seedlings growing on slopes and subjected to mechanical perturbation. In: L. Salmen (Ed.) Proc. 5th Plant Biomechanics Conference - Stockholm, August 28 - September 1.. pp 299-303
- Khuder H., 2007. Etude de l'effet d'une pente sur l'architecture et les propriétés mécaniques des systèmes racinaires de semis d'arbres. Unpublished PhD thesis - Université de Bordeaux I. 138p
- Khuder H., Stokes A., Danjon F., Gouskou K., Lagane F., 2007. Is it possible to manipulate root anchorage in young trees? *Plant Soil* 294, 87-102 + erratum *Plant Soil* (2007) 295, 293-295
- Köstler J.N., Brueckner E., Bibelriether H., 1968. Die Wurzeln der Waldbäume. Paul Parey, Hamburg, 284 p.
- Landis T.D., Evans A. K., 1974. A relationship between *Fomes applanatus* and Aspen windthrow. *Plant Disease Reporter* 58, 110-113

- Lebourgeois F., Jabiol B., 2002. Enracinements comparés du chêne sessile, du chêne pédonculé et du hêtre. Réflexions sur l'autécologie des essences. Rev. For. Fr. 54, 17-42.
- Lebourgeois F., Jabiol B., Archevêque G., Bruciamacchie M., Drexhage M., Colin F., 2004. Ancrage et stabilité du chêne et du hêtre en Lorraine. Forêt Entreprise 156, 28-33.
- Lyford W.H., 1980. Development of the root system of northern red oak (*Quercus rubra* L.). Harvard Forest Paper 21, 1-29.
- Maugé J.P., 1987. Le pin maritime, premier résineux de France. Institut pour le Développement Forestier, Paris, France. 192 p.
- Meredieu C., Stokes A., Cucchi V., 2009. L'apport de la modélisation à la prédiction de la stabilité des peuplements. Le cas du pin maritime dans les Landes de Gascogne. In: Y. Birot, G. Landmann, I. Bonhême (Eds.) La forêt face aux tempêtes. Coll. Synthèses, Quae Editions. Paris. pp 261:273.
- Nicoll B.C., Coutts M.P., 1998. Timing of root dormancy and tolerance to root waterlogging in clonal Sitka spruce. Trees - Structure and Function 12, 241-245.
- Nicoll B.C., Dunn A.J., 1999. The effects of wind speed and direction on radial growth of structural roots. In: Stokes A. (Ed.) Proceedings of the conference "The Supporting Roots of Trees and Woody Plants: Form, Function and Physiology", Bordeaux, 20-24 July 1998, Series: 'Developments in Plant and Soil Sciences', vol 87, Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, pp 61-76.
- Nicoll B.C., Easton E.P., Milner A., Walker C.D., Coutts M.P., 1995. Wind stability factors in tree selection: distribution of biomass within root systems of sitka spruce clones. In: Coutts M.P., Grace J. (Eds.) Wind and wind related damage to trees. Cambridge University Press pp 276-301.
- Nicoll B.C., Ray D., 1996. Adaptive growth of tree root systems in response to wind action and site conditions. Tree Physiology 16, 891-898.
- O'Cinnéide M.S., 1975. Aspect and wind direction as factors in forest stability: the case of Northern Ireland. Journal of Biogeography 2, 137-140.
- Pagès L., Vercambre G., Drouet J.-L., Lecompte F., Collet C., Le Bot J., 2004. Root Typ: a generic model to depict and analyse the root system architecture. Plant Soil 258, 103-119
- Parr A., Cameron A. D., 2004. Effects of tree selection on strength properties and distribution of structural roots of clonal Sitka spruce. For. Ecol. Manag. 195, 97-106.
- Puhe J., 2003. Growth and development of the root system of Norway spruce (*Picea abies*) in forest stands - a review. For. Ecol. Manag. 175, 253-273.
- Righi D., Wilbert J., 1984. Les sols sableux podzolisés des Landes de Gascogne (France) : répartition et caractères principaux. Science du Sol 4, 253-264.
- Schütz J.P., 2000. Relations vent-forêt. Dossiers de l'environnement de l'INRA 20, 198-209.
- Sellier D., Brunet Y., Fourcaud T., 2008. A numerical model of tree aerodynamic response to a turbulent airflow. Forestry 81, 279-297.
- Sellier D., Fourcaud T., 2005. A mechanical analysis of the relationship between free oscillations of *Pinus pinaster* Ait. saplings and their aerial architecture. Journal of Experimental Botany 56, 1563-1573.
- Sellier D., Fourcaud T., 2009. Crown structure and wood properties: Influence on tree sway and response to high winds. American Journal of Botany 96, 885-896.
- Sellier D., Fourcaud T., Lac P., 2006. A finite element model for investigating effects of aerial architecture on tree oscillations. Tree Physiology 26, 799-806.
- Stokes A., 2002. Biomechanics of tree root anchorage. In: Y. Weisel, A. Eshel, U. Kafkafi (Eds.) Plant roots: the hidden half. Third edition. Marcel Dekker, New York. pp 175-186.
- Stokes A., Guitard D., 1997. Tree root response to mechanical stress. In: A. Altman, Y. Waisel (Eds.) The biology of root formation and root development. Basic life sciences Vol. 65, Plenum publishing corporation, New York. pp 227-236.

Stokes A., Nicoll B.C., Coutts M.P., Fitter A.H., 1997. Responses of young Sitka spruce clones to mechanical perturbation and nutrition: effects on biomass allocation, root development, and resistance to bending. *Canadian Journal of Forest Research* 27, 1049-1057.

Stokes A., Salin F., Dupuy L., Cucchi V., 2004. Que savons-nous de la biomécanique racinaire ? *Forêt Entreprise* 156, 23-27.

Sudmeyer R.A., Speijers J., Nicholas B.D., 2004. Root distribution of *Pinus pinaster*, *P. radiata*, *Eucalyptus globulus* and *E. kochii* and associated soil chemistry in agricultural land adjacent to tree lines. *Tree Physiology* 24, 1333-1346.

Tamasi E., Stokes A., Lasserre B., Danjon F., Berthier S., Fourcaud T., Chiatante D., 2005. Influence of wind loading on root system development and architecture in oak (*Quercus robur* L.) seedlings. *Trees Structure and Function* 19, 374-384.

Teobaldelli M., Zenone, Puig D., Matteucci M., Seufert G., Sequeira V., 2007. Structural tree modelling of above and belowground poplar tree using direct and indirect measurements: Terrestrial laser scanning, WGROGRA, AMAPmod and JRC-Reconstructor. In: Prusinkiewicz P, Hanan J (Eds.) Proc. 5th International Workshop on Functional Structural Plant Models, November 4–9, 2007, Napier, New Zealand, pp 20–1 to 20–4

Weber K., Mattheck C., 2005. Die Doppelnatur der Wurzelplatte. *Allg. Forst U. Jagdz.* 176, 77-85.