

L'enracinement des arbres dans les digues en remblai : étude des systèmes racinaires et impacts sur la sécurité des ouvrages

Caroline Zanetti ^{a,c}, Michel Vennetier ^b, Patrice Mériaux ^a, Paul Royet ^a,
Simon Dufour ^c et Mireille Provansal ^c

Au fil du temps, la couverture végétale des digues en remblai se compose d'arbres plus ou moins importants dont le système racinaire interagit sur la stabilité des ouvrages et peut provoquer des circuits d'érosion interne lors du pourrissement des racines d'arbres morts. Cet article restitue les premiers travaux de recherche conduits par les auteurs en matière de caractérisation des systèmes racinaires et de techniques de diagnostic des digues, dans la perspective d'une meilleure gestion des ouvrages.

Le patrimoine des digues françaises est particulièrement important : 8 000 km de digues de protection contre les inondations, 4 000 km de digues de canaux de navigation et 1 000 km de digues d'aménagements hydro-électriques (Daly *et al.*, 2005 ; Mériaux *et al.*, 2005). Nos digues, anciennes pour la plupart, sont souvent le support d'une végétation arborescente, parfois dense et âgée.

L'enracinement des arbres engendre des risques pour les ouvrages hydrauliques en terre, qu'ils soient à charge temporaire (digues de protection contre les inondations) ou permanente (digues de canaux ou barrages). Ces risques sont principalement le fait de l'érosion interne et externe.

L'érosion interne

Elle est la principale cause de rupture des ouvrages hydrauliques, elle est aggravée par la présence des systèmes racinaires qui constituent des zones d'hétérogénéité dans le corps de digue. De leur vivant, les racines ont une action mécanique défavorable. Elles induisent le décompactage des matériaux et la déstructuration des revêtements maçonnés ou bitumés lorsque la digue en est dotée. Après pourrissement, elles génèrent un risque de renard hydraulique¹ du fait de la création de conduits favorisant les infiltrations et la circulation de l'eau, pouvant éventuellement conduire à la formation d'une brèche par effondrement (Mériaux *et al.*, 2005).

L'érosion externe

Lorsque l'arrachement d'un arbre, par le vent ou le courant, survient du côté de la masse d'eau, cela réduit ponctuellement la largeur de la digue, et peut induire une déstabilisation de l'ouvrage par rupture de pente, raccourcissement du chemin hydraulique ou surverse, et créer des courants tourbillonnaires qui érodent la digue lorsque le courant est fort (Mériaux *et al.*, 2005).

Néanmoins, les effets positifs des systèmes racinaires des espèces ligneuses sur la stabilisation des terrains en pente ont été démontrés de nombreuses fois (Abernethy et Rutherford., 2000a ; Danjon *et al.*, 2008a ; Nilaweera *et al.*, 1999 ; Norris *et al.*, 2003 ; Reubens *et al.*, 2007).

Compte tenu de l'âge des digues françaises et de la végétation qui s'y est développée, les enjeux en termes de gestion du risque d'inondation sont donc très importants. Or la littérature scientifique présente des lacunes concernant les connaissances sur les systèmes racinaires implantés sur ces milieux artificiels. Il est ainsi urgent d'acquérir les données et des connaissances scientifiques nécessaires à l'évaluation de leur niveau de sécurité.

Dans un premier temps, nous présentons ici un état de l'art concernant les différentes techniques mises en œuvre pour l'étude de la partie souterraine des arbres implantés en milieu agricole, alluvial ou forestier. À partir de cette analyse bibliographique, l'objectif est de dégager des éléments méthodologiques adaptés à l'étude de l'enracinement des arbres dans les digues. Dans

1. Érosion interne localisée dans un sol et créant progressivement une galerie à travers une digue (analogie avec le terrier d'un renard).

Les contacts

a. Cemagref, UR OHAX, Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie, 3275 route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5

b. Cemagref, UR EMAX, Écosystèmes méditerranéens et Risques, 3275 route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5

c. CEREGE, Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement, Euro-pôle Méditerranéen de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix-en-Provence Cedex 4

un deuxième temps, nous présentons les premiers résultats de l'application de ces méthodes à l'analyse des systèmes racinaires, ainsi que ceux du diagnostic de leurs impacts sur la sécurité des digues.

Synthèse bibliographique : étude des systèmes racinaires

La complexité de l'étude des systèmes racinaires est liée à la difficulté d'observation et de recueil des informations concernant la partie souterraine des végétaux. Ensuite, l'analyse des systèmes racinaires soulève différentes questions telles que la connaissance de leur architecture, de leur modalité de croissance et de leur vitesse de décomposition. Chaque axe de recherche nécessite l'acquisition de données spécifiques. L'exploitation de la littérature permet d'appréhender les moyens et techniques potentiellement applicables pour l'observation et le recueil de ces données.

2. En trois dimensions.

L'architecture racinaire

DÉFINITION ET OBJECTIF DE L'ANALYSE ARCHITECTURALE DES SYSTÈMES RACINAIRES

L'architecture racinaire est la configuration spatiale du système racinaire dans le sol. Les variables caractérisant la structure en trois dimensions du système racinaire sont la topologie et la géométrie. La topologie se caractérise par la forme des embranchements et des connexions physiques entre les racines, tandis que la géométrie est définie par la morphologie, la dimension, l'orientation et la distribution spatiale des racines (Reubens *et al.*, 2007 ; Sinoquet *et al.*, 1997b). La description de l'architecture racinaire globale et des caractéristiques des racines principales (volume, longueur, diamètre) est nécessaire pour analyser la logique de répartition et la morphologie du système racinaire en fonction des propriétés du substrat, de l'accès à l'eau, de l'espèce et de l'âge des arbres.

Le nombre, le diamètre, la longueur et le volume des racines seraient fonction de la profondeur et de la distance radiale par rapport à la souche (Danjon *et al.*, 1999b).

TECHNIQUES D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENT DES DONNÉES ARCHITECTURALES

Différentes méthodes permettent la mesure et l'analyse de l'architecture des systèmes racinaires.

Les appareils de mesure et les logiciels de traitement associés sont présentés dans cette partie et dans l'encadré 1. Les informations concernant les temps de collecte et de traitement des données, les capacités d'investigation des instruments et les avantages/inconvénients de ces techniques sont synthétisées dans le tableau 1.

L'ensemble de ces méthodes permet l'acquisition de données quantitatives sur les systèmes racinaires d'essences arborées, ainsi que la reconstitution et la visualisation de leur architecture statique en deux ou trois dimensions (tableau 1). La combinaison de plusieurs méthodes de mesures et d'analyses semble être nécessaire afin d'acquérir des connaissances complètes sur les systèmes racinaires et d'optimiser les résultats. Les mesures en trois dimensions de la structure racinaire globale (racines charpentières) couplées à des prélèvements de racines fines, afin d'étudier précisément l'architecture des systèmes racinaires, pourraient être des options intéressantes.

• La numérisation magnétique 3D²

Il s'agit d'une technique basée sur la numérisation manuelle ou semi-automatique du système racinaire après excavation. Le numériseur 3D le plus fréquemment utilisé est le 3SPACE Fastrak®, Long Ranger option, Polhemus (Danjon *et al.*, 2006 ; Danjon *et al.*, 1999a ; Fourcaud *et al.*, 2004 ; Reubens *et al.*, 2007 ; Sinoquet *et al.*, 1997a ; Sinoquet *et al.*, 1997b).

Les contraintes liées à la structure des arbres requièrent l'élaboration d'un protocole de mesure : pour la partie aérienne des arbres, le codage des informations topologiques et géométriques a été mis au point par Godin *et al.* (1997a, b) et Sinoquet *et al.* (1997a, b). Ce codage MTG (*Multiscale Tree Graph*) est lu par le logiciel AMAPmod. Du point de vue méthodologique, l'acquisition des données architecturales est similaire pour la partie racinaire de l'arbre.

La numérisation 3D est actuellement la méthode de référence pour caractériser l'architecture des plantes. Cette technique opérationnelle permet de coupler l'acquisition de la structure spatiale (coordonnées x, y, z) avec des mesures supplémentaires (dimension, nature, position) caractérisant les points numérisés, et permet également d'analyser les résultats grâce aux logiciels développés à cet effet. Appliquée aux racines, elle nécessite toutefois l'excavation préalable de la souche.

Encadré 1

Pour en savoir plus sur les différentes techniques d'acquisition et de traitement des données architecturales des systèmes racinaires

Le numériseur magnétique

Le numériseur le plus fréquemment utilisé est le 3SPACE Fastrak®, Long Ranger option, Polhemus (Danjon *et al.*, 2006 ; Danjon *et al.*, 1999a ; Fourcaud *et al.*, 2004 ; Reubens *et al.*, 2007 ; Sinoquet *et al.*, 1997a ; Sinoquet *et al.*, 1997b). Le dispositif se compose d'une unité centrale, d'un émetteur générant des champs électromagnétiques basses fréquences et d'un récepteur (pointeur que l'opérateur place sur les points à mesurer). Ce dispositif permet de mesurer les coordonnées spatiales (x, y, z) et les angles d'Euler (ψ, θ, ϕ) sur un rayon de 4 m autour de l'émetteur avec une marge d'erreur inférieure à 1 mm. Plusieurs logiciels permettent d'acquérir et de traiter les données issues de la digitalisation. Le plus utilisé est AMAPmod, développé pour l'analyse architecturale : il permet d'exécuter une exploration architecturale détaillée, de mesurer, analyser et modéliser la structure des plantes (Godin *et al.*, 1997a ; Godin *et al.*, 1997b ; Sinoquet *et al.*, 1997a ; Sinoquet *et al.*, 1997b). Ce logiciel permet également de réaliser l'analyse des distributions statistiques de la longueur, du diamètre, des angles et du volume racinaire en fonction de la profondeur et de la distance radiale par rapport à la souche (Danjon *et al.*, 2006 ; Danjon *et al.*, 1999b ; Reubens *et al.*, 2007).

Le numériseur laser

Le système laser a été mis en œuvre afin de numériser le système racinaire d'un hêtre mature (Gärtner *et al.*, 2006). Le laser terrestre Cyrax 2500 (précision de ± 4 mm) a été utilisé afin de représenter la répartition en 3D du système racinaire. Quatre scans ont été réalisés pour minimiser la perte d'information liée à l'effet « zone d'ombre ». Des repères ont été placés autour de la souche pour permettre l'assemblage des images et la reconstitution du modèle numérique tridimensionnel. Le temps requis pour chaque scan est de 15 minutes (1 h 30 en tout ; repositionnement du scanner compris). Les racines de diamètre supérieur à 4-5 mm sont bien représentées, tandis que celles inférieures à 2 mm sont perceptibles mais difficiles à différencier. Le modèle de représentation 3D est généré par le logiciel CAD/CAE Bentley, permettant d'estimer la biomasse racinaire.

La photogrammétrie

Les coordonnées en 3D permettent de définir avec précision les formes, les dimensions et la position dans l'espace de l'objet étudié. Le calage photogrammétrique nécessite l'utilisation de cibles pour établir les points de contrôle topographique et également permettre l'attribution de marques repères communes aux différentes images (Lorenzo *et al.*, 2005). Les logiciels photogrammétriques permettent d'acquérir des données quantitatives précises sur les éléments observés. Tree Analyser est un logiciel développé par l'INRA (UMR Piaf)⁴ permettant de calculer les paramètres structuraux de la partie aérienne des arbres (hauteur, diamètre, volume et surface de la couronne) à partir de photographies numériques dont les paramètres de prises de vue sont connus (Phattaralerphong *et al.*, 2000).

La prospection radar

Le radar émet des ondes électromagnétiques qui sont réfléchies en fonction des différences de propriétés des matériaux rencontrés puis détectées par un récepteur. Le radar perçoit les surfaces de contact entre les différentes couches de matériaux et les divers éléments ponctuels (tels que les câbles, conduites, blocs et racines). Butnor *et al.* (2001) ont étudié les systèmes racinaires d'essences arborées dans des sols de propriétés différentes à l'aide du « *Sub surface Interface Radar 2000 – Geophysical Survey Systems* » équipé d'antennes de 400 et 1 500 MHz. Le GPR est efficace dans les matériaux résistants (donc drainants).

La détection des racines est affectée par : (1) le gradient électromagnétique existant entre les racines et le sol, (2) la taille, la forme et l'orientation des racines, (3) la présence de corps dispersés dans le sol et (4) la fréquence de l'antenne (les ondes basses fréquences pénètrent plus profondément dans le sol) – Butnor *et al.*, 2001. Le GPR EKKO 1000 TM, 450 MHz, a été utilisé dans le cadre d'études portant sur la morphologie des systèmes racinaires. Les racines de diamètre inférieur à 2 cm ne sont pas détectables par le radar car elles se situent dans la marge d'erreur des mesures instrumentales (Cermak *et al.*, 2000). Les fichiers de données sont traités avec des logiciels spécialisés dans l'interprétation des données géophysiques (traitements et évaluation du signal : EKKO Tools 42 and Reflex3, WINRAD, OpenDX) – Butnor *et al.*, 2001 ; Cermak *et al.*, 2000 ; Hruska *et al.*, 1999 ; Wielopolski *et al.*, 1999. La reconstitution d'une image 3D à partir des données radar permet d'évaluer la morphologie, la surface et le volume racinaire (Hruska *et al.*, 1999 ; Cermak *et al.*, 2000). Cependant, la fiabilité des résultats semble réduite, l'image étant reconstituée par retraçage manuel (dessin) des racines d'après l'interprétation des signaux sur le radargramme.

4. Institut national de la recherche agronomique, unité mixte de recherche « Physique et physiologie intégratives de l'arbre fruitier et forestier ».

- **La numérisation laser 3D**

La numérisation 3D à balayage est basée sur l'émission-réception de faisceaux laser (onde lumineuse). Le faisceau laser balaye un champ de vision prédéfini et mesure, pour chaque point de la surface balayée, la distance entre l'émetteur et le point. L'impulsion lumineuse est réfléchiée par la surface de l'objet observé, puis captée par un détecteur photoélectrique (enregistrement des coordonnées spatiales).

Le laser terrestre permet l'acquisition de données précises sur la structure des végétaux (Gärtner *et al.*, 2006), qui semble appropriée à l'étude de l'architecture racinaire d'essences arborées. Cette technique a été mise en œuvre lors des dernières études réalisées sur les systèmes racinaires implantés dans les digues (Cf. les études Cemagref sur l'enracinement des arbres dans les digues).

- **La photogrammétrie**

La photogrammétrie est une technique permettant le géoréférencement relatif d'un objet photographié sous différents angles de vue (Lorenzo *et al.*, 2005).

Cependant, dans le cas des photographies de systèmes racinaires, la perte d'informations visuelles par masquage est importante et nuit à la reconstitution 3D.

Qu'il s'agisse du numériseur magnétique, du numériseur laser ou de la photogrammétrie, ces trois techniques nécessitent une excavation complète des systèmes racinaires afin de pouvoir les ausculter et procéder à l'acquisition des données. Il s'agit donc de techniques destructives.

- **La prospection radar (GPR)³**

Le GPR est une méthode qui, à la différence des techniques énoncées précédemment, permet la prospection du sous-sol de façon non destructive et ainsi d'acquérir des données sur la partie souterraine des arbres dans leurs configurations réelles (c'est-à-dire en ayant évité la perte d'information liée aux destructions de racines lors de l'excavation et à la déformation, sous l'effet de la gravité, des systèmes racinaires observés hors sol).

Le radar émet des ondes électromagnétiques qui sont réfléchies en fonction des différences de propriétés des matériaux rencontrés puis détectées par un récepteur. Le radar perçoit les surfaces de contact entre les différentes couches de matériaux et les divers éléments ponctuels (tels que

les câbles, conduites, blocs et racines) – Butnor *et al.*, 2001 ; Cermak *et al.*, 2000 ; Stokes *et al.*, 1999 ; Wielopolski *et al.*, 1999.

Des tests ont été effectués par le Cemagref en collaboration avec l'Institut hydraulique danois au moyen du GPR SEEKER 250S (*US Radar – Sub Surface Imaging Systems*). Muni d'une antenne 250 MHz, ce système devrait permettre la prospection souterraine jusqu'à 13,5 m de profondeur. Ces essais radar ont été réalisés sur les digues de l'Agly (Pyrénées-Orientales) en avril 2007 et sur les digues du Rhône (Camargue). L'interprétation des signaux sur les radargrammes permet la détection de blocs de pierres, de conduites traversantes, de secteurs de remaniements des matériaux (travaux de réparation de l'ouvrage) et de racines d'arbres. Il serait nécessaire de mettre en œuvre une opération de déterrage sur les secteurs présentant les irrégularités énoncées afin de valider ces interprétations. Dans l'ensemble, les résultats révèlent une limitation de la profondeur de prospection à un mètre dans les matériaux limono-argileux (dissipation du signal). Cette limite est gênante pour les digues de protection contre les inondations, souvent constituées de ce type de matériaux, caractérisés par une faible résistivité électrique.

Les méthodes d'étude de la croissance et du développement des systèmes racinaires

PROCESSUS CARACTÉRISANT LE DÉVELOPPEMENT DES SYSTÈMES RACINAIRES

La comparaison de systèmes racinaires d'âges différents, d'espèces identiques, dans des conditions similaires, permet d'appréhender le processus de développement des appareils racinaires et l'évolution des volumes racinaires en fonction de l'âge des individus (Atger et Edelin, 1994).

L'analyse architecturale de différentes espèces, réalisée par Atger et Edelin (1994), a révélé une grande analogie des appareils souterrains et aériens, tant du point de vue statique que dynamique.

Du point de vue statique

Il y a une analogie structurale et fonctionnelle, car le tronc et les branches principales s'assimilent au pivot et aux racines charpentières et constituent des systèmes d'axes pérennes édificateurs et explorateurs. Les branches secondaires correspondent aux racines ligneuses secondaires

3. Ground Penetrating Radar.

▼ Tableau 1 – Synthèse des différentes techniques d'acquisition de données sur l'architecture racinaire.

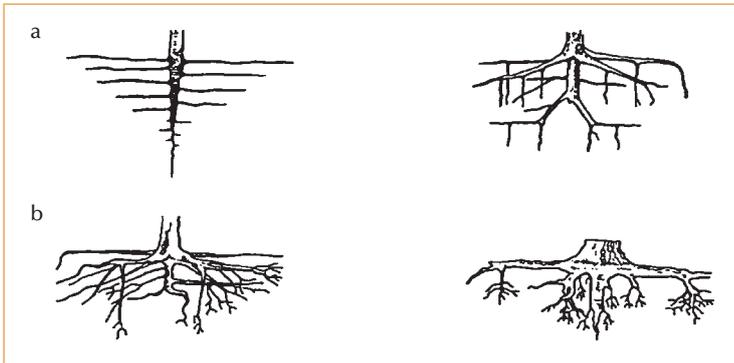
	Numériseur magnétique	Numériseur laser	Photogrammétrie	Radar (GPR)
Type d'information	Description 3D complète. Dimension, distribution, surface, volume.	Description 2D et reconstitution possible en 3D. Dimension, distribution, surface, volume.	Description 2D. Dimension, distribution, surface.	Description 2D et reconstitution possible en 3D. Dimension, distribution, surface, volume.
Résolution	Diamètre des racines digitalisées supérieur à 2mm. Possibilité de numériser des racines de diamètre inférieur (choix de l'opérateur).	Mauvaise perception des racines de diamètre inférieur à 2 mm.	Dépend de la résolution de l'appareil numérique et de la dimension du système racinaire (diminution de la précision avec l'augmentation de la distance de prise de vue).	Dépend de la fréquence des antennes. Perception des racines de diamètre supérieur à 1 cm.
Profondeur	Dépend des conditions d'excavation du système racinaire (casse des racines profondément ancrées).	Dépend des conditions d'excavation du système racinaire (casse des racines profondément ancrées).	Dépend des conditions d'excavation du système racinaire (casse des racines profondément ancrées).	Dépend du type de matériaux (conducteurs ou non), de leur taux d'humidité et de la fréquence de l'antenne.
Temps	2 heures à 2 jours pour la numérisation suivant la taille du système racinaire. 1 à 7 heures de traitement des données.	1 h 30 pour la numérisation du système racinaire. De 10 à 15 heures de traitement de données.	Quelques minutes pour les prises de vue. Temps de traitement des données non indiqué.	30 minutes à 5 heures selon le type de radar (les systèmes à conversion vitesse/profondeur instantanée et retour du signal direct en surface sont plus rapides). 30 heures de traitement des données.
Avantages	Méthode opérationnelle (techniques de mesures et programmes d'analyse). Acquisition semi-automatique. Données et résultats très précis. Manipulation aisée.	Acquisition automatique. Données et résultats précis. Manipulation très aisée.	Acquisition automatique. Manipulation très aisée.	Méthode non destructive. Acquisition semi-automatique. Manipulation aisée.
Inconvénients	Complexité des logiciels de traitement. Interférences des objets métalliques avec le champ électromagnétique. Méthode destructive.	Effet d'ombrage (perte d'informations visuelles). Méthode destructive.	Données et résultats peu précis. Fort effet d'ombrage (perte d'informations visuelles). Pas de reconstitution 3D. Méthode destructive.	Données et résultats très peu précis. Influence des propriétés du substrat. Nécessité d'extraire le système racinaire afin de vérifier la fiabilité des données (évaluation de la technique).
Auteurs	Danjon <i>et al.</i> , 2006 ; Fourcaud <i>et al.</i> , 2004 ; Reubens <i>et al.</i> , 2007 ; Sinoquet <i>et al.</i> , 1997 ; Sinoquet et Rivet, 1997.	Gärtner et Denier, 2006.	Lorenzo et Arias, 2005.	Stokes <i>et al.</i> , 1999a ; Cermak <i>et al.</i> , 2000 ; Wielopolski <i>et al.</i> , 2000 ; Butnor <i>et al.</i> , 2001.

qui sont des organes d'exploitation colonisant le milieu. Et enfin, les feuilles correspondent aux chevelus racinaires, organes assimilateurs localisés en périphérie du système.

Du point de vue dynamique

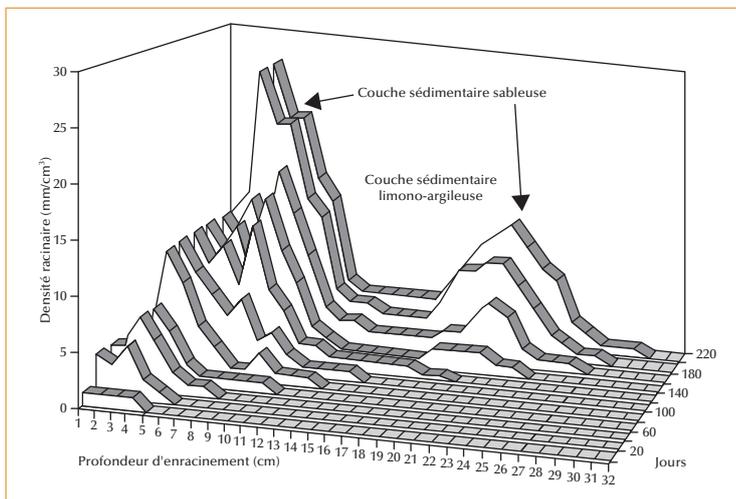
Il y a une analogie ontogénique (relative au développement), car les appareils caulinaires et racinaires se développent par intercalation : les

organes assimilateurs sont sans cesse repoussés à la périphérie du système à l'apparition de chaque nouvelle classe racinaire ou tige. Par ce processus, la plante conserve toujours à sa périphérie une interface assimilatrice avec le milieu. Ils ont, tous deux, une aptitude à la réitération (répétition des unités architecturales) qui est un moyen d'accroître considérablement la surface globale occupée par les systèmes aérien ou souterrain.



▲ Figure 1 – Architecture du système racinaire des espèces ligneuses en fonction des contraintes locales.

- a) En l'absence de contraintes au niveau du substrat, développement vertical du système racinaire et mise en place d'un pivot.
b) Dans des substrats à fortes contraintes hydriques (anoxie) et/ou granulométriques, développement de ramifications latérales et mise en place d'un système racinaire de type traçant (Foussadier, 2003, d'après Atger, 1991).



▲ Figure 2 – Évolution de la densité racinaire du saule blanc dans un sol stratifié. L'alternance de couches sédimentaires (structure) aux propriétés différentes, caractéristique des milieux alluviaux, dicte la répartition des racines, qui se développent préférentiellement dans les sédiments de plus grande porosité (meilleure aération) – Foussadier, 2003.

L'INFLUENCE DU MILIEU

L'influence du milieu sur la structure des systèmes racinaires d'essences arborées et la distribution des racines sont généralement appréhendées *in situ*, par observation et dénombrement, lors de l'excavation des souches. Foussadier (2003) a mis en évidence qu'en l'absence de toutes contraintes hydriques, nutritionnelles ou pédologiques, les systèmes racinaires des espèces ligneuses sont de type pivotant. Cependant, dans le cas des milieux alluviaux notamment, du fait des conditions souvent contraignantes (anoxie des horizons en fonction des couches sédimentaires déposées, ou battements de la nappe phréatique), les systèmes pivotants évoluent et adoptent une structure traçante (figure 1). La disponibilité en eau (positions de la nappe phréatique) et les paramètres pédologiques sont donc les deux principaux facteurs influençant la structure des systèmes racinaires. En effet, la distribution des racines s'effectue en fonction des différences de texture (granulométrie), de structure et de porosité des matériaux (figure 2).

Les contraintes externes (vent ou crues) induisent également une adaptation de la morphologie des systèmes racinaires (Dupuy *et al.*, 2005 ; Fourcaud *et al.*, 2004 ; Stokes, 1999 ; Tamasi *et al.*, 2005). Un réseau de racines dense se développe généralement dans le sens opposé au vent dominant pour assurer une meilleure résistance à l'arrachement, de même que sur les terrains en pente où les racines charpentières sont préférentiellement dirigées vers le haut du talus (Abernethy *et al.*, 2000b ; Danjon *et al.*, 2008b).

La décomposition racinaire

OBJECTIF DE L'ANALYSE DE LA DÉCOMPOSITION DES SYSTÈMES RACINAIRES

Dans le cas des ouvrages hydrauliques en terre, il est nécessaire d'appréhender les effets de la décomposition des systèmes racinaires, suite à l'abattage ou à la mort naturelle des arbres.

Les souches et racines pourries peuvent en effet induire des déstructurations locales du remblai, ainsi qu'un risque de renard hydraulique lié à la création de conduits.

Les bois sains et pourris n'ont pas les mêmes caractéristiques mécaniques et chimiques. La transformation du bois sous l'effet de la décomposition passe par différents stades clairement identifiables. La première phase se traduit par une modification de la coloration naturelle du bois (discoloration) sans perte de résistance. L'échauffure est le premier stade de la pourriture et se caractérise par des veines colorées ou des discolorations dans le bois, avec encore peu d'effet sur la texture générale et les propriétés mécaniques. Enfin, la pourriture se matérialise par la décomposition du bois sous l'action de champignons, d'insectes ou de micro-organismes, créant un ramollissement, une perte progressive de masse et de résistance mécanique, avec un changement de texture et de couleur (Longuetaud *et al.*, 2001). La description du processus de décomposition des systèmes racinaires, la qualification de l'état de dégradation et la quantification de la vitesse de décomposition du bois des racines sont nécessaires pour appréhender leurs effets sur le milieu environnant et notamment sur la structure du substrat (Watson *et al.*, 1999).

PROTOCOLLES DE MESURE DU DEGRÉ DE DÉCOMPOSITION

Edmonds *et al.* (1986) ont démontré que la vitesse de décomposition est corrélée positivement avec le taux d'humidité et la température, que le bois de petit diamètre se décompose généralement plus rapidement que le bois de plus grand diamètre, que la vitesse de décomposition du bois augmente avec la profondeur d'enfouissement et qu'il y a une variabilité de la sensibilité du bois à la décomposition en fonction des espèces végétales.

Différents protocoles permettent d'évaluer qualitativement et quantitativement le degré de décomposition du bois.

• Évaluation qualitative du degré de décomposition

La description de l'état de décomposition du bois répond généralement à des critères visuels et tactiles permettant d'établir des classes en fonction du degré de détérioration du bois (Sandstrom *et*

al., 2007 ; Tobin *et al.*, 2007). Les paramètres pris en compte sont l'état de l'écorce, la fragmentation et la dureté du bois.

• Évaluation quantitative du degré de décomposition

La résistance mécanique du bois, la structure interne et la masse volumique du bois peuvent être quantifiées et renseignent sur l'avancement de l'état de décomposition du bois :

- la résistance mécanique du bois et sa consistance peuvent être mesurées à l'aide d'un pénétromètre portatif, par enfoncement d'une tige métallique (Lee *et al.*, 2001 ; Tobin *et al.*, 2007) ;

- la structure interne du bois peut être appréhendée par l'analyse de sa porosité. La numérisation des échantillons permet une analyse d'images assistée par ordinateur afin d'évaluer la surface des pores. La porosité de l'échantillon permet d'évaluer le degré de dégradation du bois (Costa *et al.*, 2006). La détection de singularités dans la structure du bois en surface et en volume peut également être effectuée par radiographie ou tomographie (rayons-X) – Martinis *et al.*, 2004 ;

- le calcul de la masse volumique permet d'évaluer la densité des échantillons de bois et de déterminer leur degré de décomposition, en comparaison avec la masse volumique d'un bois sain (de même espèce végétale). La détermination directe de la densité s'effectue sur des carottes ou des rondelles (Sandstrom *et al.*, 2007 ; Tobin *et al.*, 2007).

Le recueil d'échantillons de racines d'arbres dont les dates de mort sont connues et variées est indispensable pour évaluer la vitesse de dégradation du bois et les transformations affectant le substrat.

Dans le cadre de nos travaux *in situ*, un protocole d'étude simplifié des systèmes racinaires a été établi afin de décrire la structure des systèmes racinaires d'arbres sur pied et d'évaluer l'état de décomposition des racines de souches pourries. L'objectif de ce travail est d'acquérir des connaissances objectives permettant d'appréhender l'impact du développement et de la décomposition des systèmes racinaires d'essences arborées sur les ouvrages hydrauliques en remblai à charge permanente ou temporaire.

Les études Cemagref sur l'enracinement des arbres dans les digues

Une forte demande des gestionnaires

Les gestionnaires d'ouvrages attendent des recommandations pour l'entretien de la végétation ligneuse implantée sur les digues, prenant en compte le risque induit par la présence des systèmes racinaires vivants ou en décomposition. Les études Cemagref poursuivent donc trois objectifs :

- caractériser la structure 3D des systèmes racinaires en fonction des principaux paramètres de contrôles (espèce végétale, âge des souches, nature des matériaux constitutifs de la digue [texture, compacité et fertilité], position de l'arbre sur la digue, accès à l'eau, climat local) ;
- déterminer une typologie racinaire en fonction de leurs caractéristiques architecturales (longueur, décroissance en diamètre et ramification) ;

– observer le phénomène de décomposition racinaire *in situ* en fonction de la date de mort des arbres, du diamètre des racines et de la nature des matériaux.

Les résultats scientifiques permettront d'une part, d'accroître les connaissances des caractéristiques architecturales des systèmes racinaires et de leur développement, et d'autre part, de tester et améliorer des techniques d'acquisition de ces données difficiles d'accès.

Matériels et méthodes

Des souches ont été régulièrement excavées depuis 2003 sur les digues à charge hydraulique permanente – aménagements hydroélectriques du Rhône (Chandioux *et al.*, 2003, 2005 ; Zanetti, 2007) ou temporaires – digues de protection contre les inondations de l'Isère (Doirat *et al.*, 2003) – tableau 2.

Dans un premier temps, *in situ*, les souches sont arrachées et leur structure est décrite (photo 1). Ensuite, une fois mises en dépôt, la descrip-

▼ Tableau 2 – Synthèse des études réalisées par le Cemagref (Chandioux *et al.*, 2003, 2005 ; Doirat *et al.*, 2003 ; Zanetti, 2007) sur les systèmes racinaires sur les digues de canaux du Rhône et sur les digues de protection contre les crues de l'Isère.

Site	Date	Nombre d'arbres	Âge des souches	Espèce	Type d'étude
Grenoble (38) Digues Isère	Janvier 2003	38	< 60 ans	Peuplier blanc, merisier, frêne, érable, robinier, tilleul	Observation de la structure racinaire et de la distribution des racines en fonction du contexte.
Roussillon (38) Digues Rhône	Février 2003	22	< 25 ans	Robinier, peuplier	
St Vallier (26) Digues Rhône	Novembre 2005	18	< 30 ans	Robinier, pin noir ; pin sylvestre	
Montélimar (26) Digues Rhône	Mai 2007	9 et 6 Sp*	< 40 ans	Robinier, chêne blanc, peuplier	Observation de la structure racinaire/contexte. Mesures des caractéristiques architecturales.
Donzère (26) Digues Rhône	Avril 2007	3 et 6 Sp*	< 45 ans	Chêne vert, peuplier	
Lyon (69) Digues Rhône	Juillet 2007	19 et 6 Sp*	> 50 ans	Robinier, frêne, érable, peuplier, chêne	Observation de la structure racinaire/contexte. Mesures des caractéristiques architecturales. Numérisation des souches.

*Sp : Souches pourries

tion de la structure des systèmes racinaires est complétée par l'acquisition de données quantitatives. Les racines de souches vivantes font l'objet de mesures manuelles détaillées (longueurs, diamètres, embranchements) – photo 2. L'objectif est de caractériser quantitativement l'architecture racinaire de certaines racines représentatives afin d'appréhender leur logique de distribution, de croissance et de ramification (tableau 3).

La numérisation de certaines souches par laser terrestre, permettant d'acquérir des données précises et durables, a été testée en 2007 (photo 3 – Laser terrestre de courte portée – ATM3D).

Enfin, la description de la décomposition des racines a été effectuée à partir des éléments observables sur le terrain. Les souches extraites sur l'ensemble des sites étaient en décomposition depuis dix à quinze ans. Le protocole de description qualitatif de la décomposition des souches mortes permet d'évaluer les caractéristiques du bois des racines, sa dureté, sa friabilité, ses effets sur la transformation de la structure des matériaux et ses prédispositions à favoriser des infiltrations d'eau. Nous avons étudié la décomposition des racines en fonction des matériaux constitutifs de la digue, de la profondeur, de la dimension des racines et de leur éloignement par rapport au centre de la souche.



▲ Photo 1 – Excavation d'une souche vivante.

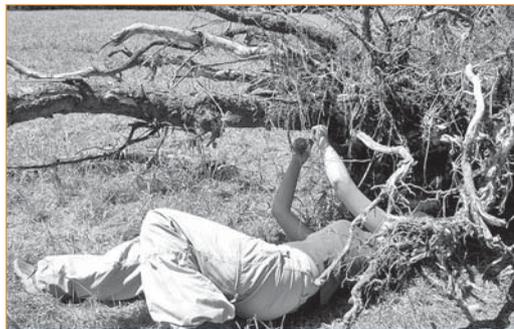
▼ Tableau 3 – Nombre de racines représentatives mesurées (Zanetti, 2007).

Espèce	Chêne	Robinier	Frêne	Peuplier	Total
Nombre de racines	39	41	14	12	96

Résultats scientifiques et techniques

CARACTÉRISATION DE LA STRUCTURE DES SYSTÈMES RACINAIRES

La structure des systèmes racinaires résulte d'un compromis entre héritage génétique et interaction avec le milieu (Atger, 1991 ; Atger *et al.*, 1994). Les observations réalisées au cours des



▲ Photo 2 – Mesures manuelles.



▲ Photo 3 – Numérisation des souches.

chantiers d'arrachage ont mis en évidence que la morphologie des systèmes racinaires était en effet influencée par l'espèce végétale, le milieu (nature et structure des matériaux) et le contexte (position de l'arbre sur la digue) – tableau 4.

Les données issues de la numérisation des systèmes racinaires constituent une source d'information précise et durable. Elles permettent de saisir des mesures détaillées sur l'architecture racinaire (longueurs, diamètres, angles), de calculer le volume d'encombrement des souches ainsi que de vérifier et compléter les mesures effectuées *in situ* (figure 3).

La description de la structure des systèmes racinaires implantés sur les digues a été complétée et précisée par l'analyse des données quantitatives acquises lors des mesures effectuées *in situ*, caractérisant l'architecture racinaire à plus grande échelle.

CARACTÉRISATION ARCHITECTURALE DES RACINES

Une typologie racinaire a été élaborée d'après les observations et les mesures effectuées *in situ*. Ainsi, trois types de racines ont été déterminés en fonction de leur diamètre de départ, de leur longueur, du nombre de ramifications et de leur inclinaison (tableau 5).

Les racines pivotantes sont généralement verticales [V] : « P = pivot et PS = pivot secondaire »

(photo 4). Les racines traçantes « T » sont horizontales [H] ou obliques [O] et se divisent en deux catégories, les traçantes longues « TL » (photo 5a) et les traçantes courtes « TC » (photo 5b). Chacun de ces deux types se subdivisent en trois classes en fonction de leur diamètre et de leur longueur, les TL ou TC grosses « g », moyennes « m » et fines « f ».

Chaque type de racine se caractérise par un taux de décroissance qui varie en fonction de l'espèce (tableau 6). La décroissance du diamètre des racines traçantes longues (TL) est plus faible que celle des traçantes courtes (TC), qui est également plus faible que celle des racines pivotantes (P). Ces trois types de racines se distinguent nettement sur les courbes de décroissance (figure 4).

Le robinier, comme le peuplier, a la capacité d'émettre des racines traçantes (généralement horizontales) de très grande longueur et de diamètre très important (diamètres de l'ordre de 10 cm à plus de 4 m de distance de la souche).

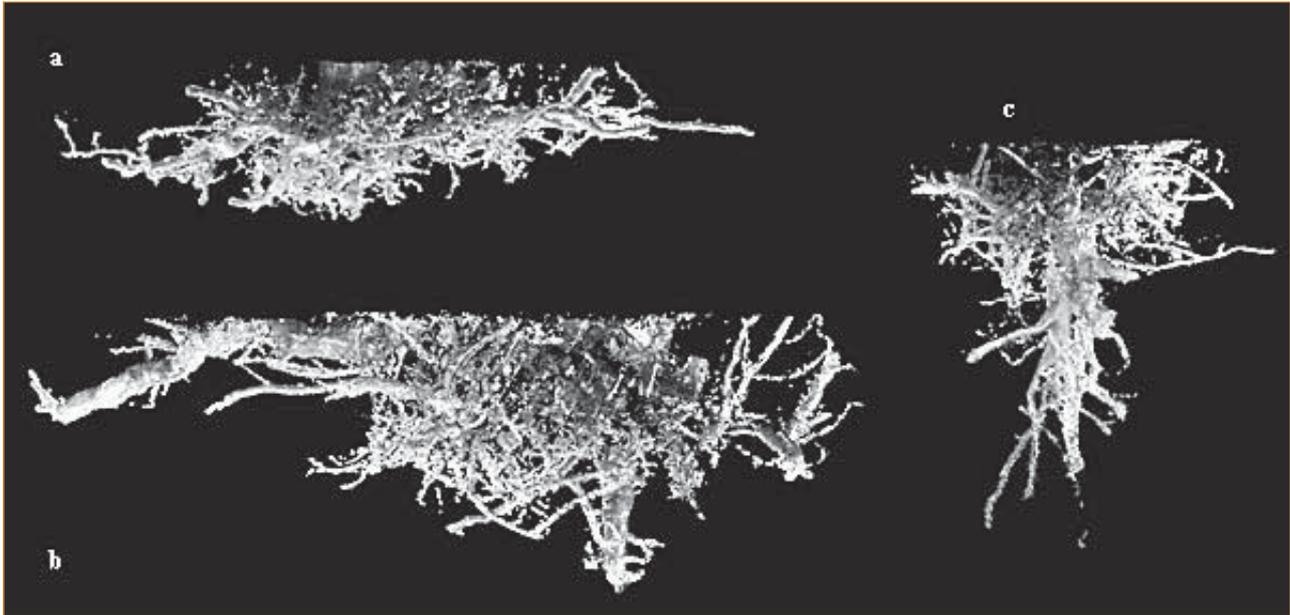
Les racines de type TLg du robinier se caractérisent par des sections à décroissance quasi-nulle (figure 4) qui expliquent leur grande longueur.

Le frêne, comme le chêne, se caractérise par des racines traçantes nettement moins longues.

Pour un même type de racine, celles ayant un gros diamètre de départ décroissent plus rapidement que celles de petit diamètre (figure 5).

▼ Tableau 4 – Paramètres influençant l'architecture des systèmes racinaires.

Espèce végétale	<ul style="list-style-type: none"> • robinier, frêne, érable : systèmes racinaires traçants à mixtes (figures 3a et 3b), • peuplier, chêne : systèmes racinaires mixtes à pivotants (figure 3c), • vieux robiniers : racines traçantes très longues et de gros diamètre, • vieux peupliers : pivot(s) puissant(s) et racines traçantes longues de gros diamètre.
Matériaux constitutifs de la digue	<ul style="list-style-type: none"> • matériaux argilo-limoneux compacts : très faible développement racinaire en profondeur, • matériaux granulaires grossiers : développement racinaire dense et profond.
Position de l'arbre sur la digue	<ul style="list-style-type: none"> • en sommet de digue : systèmes racinaires majoritairement traçants, • en milieu et pied de digue : systèmes racinaires mixtes et pivotants, développement d'une part importante des racines principales traçantes en direction d'une ressource en eau accessible, sinon, développement d'un système racinaire en étoile (sans direction privilégiée).



▲ Figure 3 – a) Architecture racinaire traçante d'un frêne situé en sommet de digue ; b) Architecture racinaire mixte d'un robinier situé en milieu de digue ; c) Architecture racinaire pivotante d'un chêne blanc situé en milieu de digue. Source : Nuages de points issus de la numérisation laser des souches (IMView3D).

▼ Tableau 5 – Typologie racinaire commune aux cinq espèces étudiées.

Type	Sous-type	Inclinaison	Ramifications	Diamètre au départ	Longueur de la racine
Pivotantes	P	V	Variables	> 5 cm	> 50 cm
	PS	V/O/H	Peu nombreuses	< 5 cm	< 1 m
Traçantes longues	TLg	H	Peu nombreuses (tous les quelques dizaines de cm)	> 5 cm	> 2 m
	TLm	H]1 ; 5[> 1 m
	TLf	H]0,3 ; 1]	> 50 cm
Traçantes courtes	TCg	H/O	Nombreuses (tous les quelques cm)	> 5 cm	< 2 m
	TCm	H/O]1 ; 5[< 1 m
	TCf	H/O]0,3 ; 1]	< 50 cm

P : pivot ; PS : pivot secondaire ; TLg : traçante longue grosse ; TLm : traçante longue moyenne ; TLf : traçante longue fine ; TCg : traçante courte grosse ; TCm : traçante courte moyenne ; TCf : traçante courte fine ; V : verticale ; O : oblique ; H : horizontale.

• État de décomposition souches et des racines

L'avancement de la décomposition est fonction du diamètre des racines et de la distance à la souche. Les grosses racines, à proximité de la souche, sont davantage conservées que les fines (plus éloignées) qui se désagrègent dans les maté-

riaux lors de l'excavation. Si la partie extérieure de la souche est conservée (zone de départ des racines de diamètre très important), le cœur de la souche est souvent dégradé – ce qui aboutit à une souche creuse – du fait des infiltrations d'eau dans les fibres du bois lorsqu'il affleure en surface (photo 6).



▲ Photo 4 – Pivot et pivots secondaires (chêne).

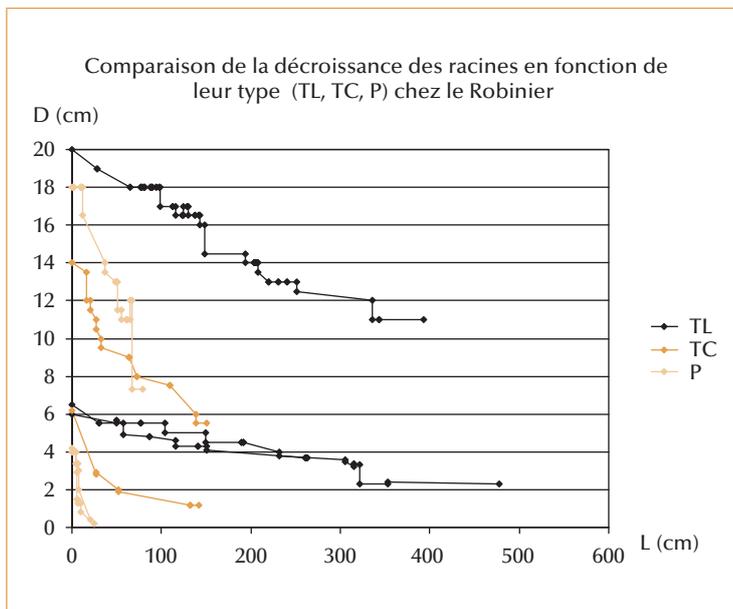
▼ Tableau 6 – Décroissance moyenne (%) par type de racines en fonction de l'espèce.

Exemple : en moyenne, une racine de robinier de type TLg perd 1,5 cm de diamètre en un mètre, tandis qu'une racine de type TCg perd 9,9 cm de diamètre en un mètre.

Type de racines	Robinier	Frêne	Chêne	Peuplier
TLg	- 1,48	- 3,29	- 3,01	- 2,12
TLm	- 0,38	- 1,95	- 1,64	- 1,50
TCg	- 9,85	- 8,06	- 9,14	- 7,59
TCm	- 3,80	- 3,18	- 3,75	-
P	- 13,61	-	- 13,43	- 9,78
Nombre de racines (92)	31	14	35	12

TLg : traçante longue grosse ; TLm : traçante longue moyenne ; TCg : traçante courte grosse ; TCm : traçante courte moyenne ; P : pivot.

► Photo 5 –
a) TLg (frêne) ;
b) TCg (frêne).



▲ Figure 4– Taux de décroissance des racines de robinier.

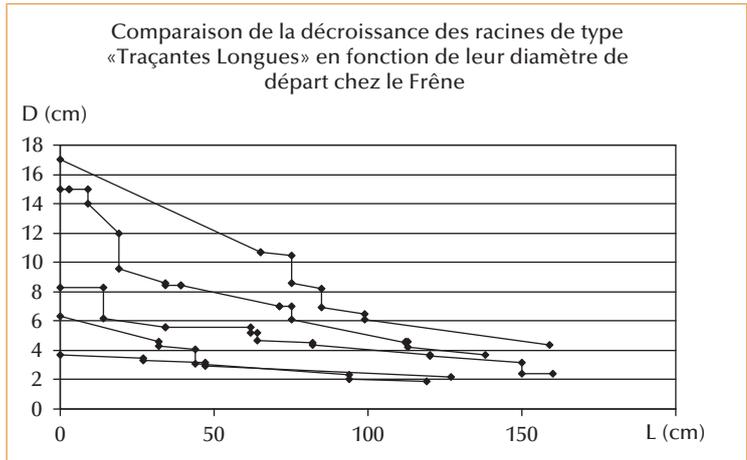
Le bois en décomposition se défibre selon les axes des rayons ligneux et des cernes de croissance. Cependant, une certaine variabilité de la décomposition a pu être observée, liée à des attaques localisées de champignons ou de larves. Sur ces sections, le bois se désagrège lors de l'excavation, notamment quand il est réduit en poudre par des attaques d'insectes (photo 7).

• Décomposition racinaire en fonction des matériaux

Les racines pourries constituent dans certains cas de véritables conduits, induisant un risque pour l'ouvrage en cas de circulation d'eau. Ces galeries restent en place, après la décomposition totale de la racine, si elles se trouvent dans des matériaux fins et cohésifs ou compactés (photo 8). Les racines peuvent également créer des conduits dans les matériaux sablo-graveleux lorsque le bois de cœur se désagrège plus rapidement que le bois périphérique ou l'écorce (photos 9 et 10).



▲ Photo 6 – Souche creuse avec départ de grosses racines.



▲ Figure 5 – Taux de décroissance des racines de frêne.



▲ Photo 7 – Traces d'attaques de larves et insectes.



▲ Photo 9 – Disparition du bois de cœur, laissant un conduit au centre de la racine.



▲ Photo 8 – Conduit de 10 cm de diamètre généré par une racine de peuplier (utilisé par les racines d'un chêne vert implanté à proximité).



► Photo 10 – Galerie formée par l'écorce en place sur une racine de robinier de 1 cm de diamètre.

Discussion : premiers éléments à tirer en termes de sécurité des ouvrages

STRUCTURE RACINAIRE ET RISQUES POUR L'OUVRAGE

Les systèmes racinaires entraînent une modification non négligeable de la structure du corps de la digue. De plus, le développement racinaire dans la digue peut être plus ou moins gênant vis-à-vis de la sécurité de l'ouvrage en fonction du style architectural, qui dépend des matériaux du remblai, de l'accès à l'eau et de l'espèce végétale.

• Développement racinaire en fonction des matériaux

La majorité des systèmes racinaires sur digue se caractérise par un réseau dense de racines superficielles traçantes, localisé principalement dans les trente premiers centimètres. De ce réseau partent d'innombrables racines fines absorbantes, du fait de la présence de matériaux plus fertiles en surface (début de formation d'humus), ce qui permet sans doute de capter plus rapidement l'eau de pluie. Les racines peuvent pénétrer profondément verticalement dans les matériaux perméables (plus de deux mètres). Elles colonisent préférentiellement les zones sableuses ou gravillonneuses possédant une proportion de limons ou d'argile, qui assurent les apports nutritifs et la rétention de l'eau. La prospection racinaire est plus faible dans les matériaux grossiers riches en gros graviers et galets, trop drainants, chimiquement pauvres, et obligeant les racines à contourner sans cesse des obstacles. Elle est quasi nulle dans les matériaux compactés imperméables.

• Développement racinaire en fonction de l'accès à l'eau

La morphologie des systèmes racinaires s'adapte aux besoins en eau de l'arbre. Chez le robinier et le peuplier, de grosses racines traçantes se développent jusqu'à plus de dix mètres en direction de l'eau par le chemin le plus court. Les arbres à système racinaire traçant se situent essentiellement en haut de digue tandis que le développement de structures pivotantes s'observe lorsque les arbres sont implantés en milieu ou pied de digue, et que la nappe est accessible verticalement. Lorsque des racines traçantes ou pivotantes atteignent une source permanente d'eau (nappe, canal ou rivière), elles cessent leur croissance en

longueur : elles se ramifient alors en centaines de petites racines courtes elles-mêmes couvertes de millions de radicules qui forment un feutrage très dense pouvant couvrir plusieurs mètres carrés au niveau de l'interface avec l'eau. La structure racinaire paraît ainsi fortement influencée par la recherche d'eau.

• Développement racinaire en fonction de l'espèce

Chaque espèce végétale développe préférentiellement certains types d'architecture racinaire et présente des prédispositions plus ou moins défavorables à la sécurité des digues.

Les peupliers, développant des pivots très puissants (plus de 50 cm de diamètre au départ, et encore 20 cm à 2 m de profondeur) mais également de longues racines traçantes de gros diamètre (30 cm de diamètre au départ et plus de 5 m de long), sont *a priori* dangereux pour les digues.

Le robinier se caractérise par une structure traçante dominante. C'est pourquoi il a été jadis planté avec succès pour limiter l'érosion des talus de digues. Mais il développe avec le temps, surtout quand il est régulièrement recoupé, des racines aux dimensions disproportionnées par rapport à la taille des arbres. Sur les systèmes mixtes, les pivots sont de dimensions moyennes et dépassent rarement 1,5 m de profondeur. Le mode de reproduction du robinier par drageons le rend difficile à éliminer sans traitements chimiques, ce qui en fait une espèce peu favorable sur les digues.

Les systèmes racinaires à structure mixte ou pivotante des chênes que nous avons observés se caractérisent par une distribution relativement homogène des racines et une extension limitée autour de la souche. À l'état jeune, ils posent moins de problèmes que les robiniers ou les peupliers. Cependant, avec l'âge, ces souches peuvent atteindre des dimensions importantes et être ancrées à plus de deux mètres de profondeur. Le nombre de chênes étudiés est encore trop faible pour généraliser ces conclusions.

Les frênes développent des racines à dominante traçante qui, bien que courant sur de longues distances, restent de faible diamètre et superficielles (50/75 cm de profondeur). Cette espèce peut poser des problèmes sur les digues de petites et moyennes dimensions.

• Style architectural et risques pour la digue

Les systèmes à dominante pivotante génèrent un risque pour les ouvrages car ils pénètrent le corps du remblai. Ils assurent un bon ancrage de l'arbre par leurs pivots, limitant les risques d'arrachement, mais posent les problèmes de la déstructuration et de la décompaction des matériaux en profondeur. La pourriture des souches à fort pivot provoque des fontis (affaissements de terrain) et génère des irrégularités de la surface de la digue.

Les systèmes à structure traçante sont peu résistants au risque d'arrachement mais assurent en contrepartie une fixation de la partie superficielle du sol (moyen de lutte efficace contre le ravinement). Ce type d'architecture est dangereux pour l'ouvrage lorsque les racines traçantes traversent une partie ou la totalité de la digue, déstructurant les matériaux et générant des conduits dangereux après leur mort.

Le système racinaire à structure mixte rassemble les avantages et inconvénients précédemment énoncés.

DÉCOMPOSITION RACINAIRE ET RISQUES POUR L'OUVRAGE

Dans notre étude, la qualité des observations conduites sur le terrain dépendait des pertes d'informations liées à la désagrégation des racines en état de décomposition avancée, et qui s'effritaient lors de la manipulation des matériaux. En termes d'architecture racinaire, la décomposition de gros pivots (30 cm de diamètre et plus) induit un risque de fontis, tandis que celle de grosses racines traçantes (10 cm et plus) génère un risque de renard hydraulique.

Cependant, les racines en décomposition semblent avoir moins d'effet sur la structure de l'ouvrage lorsque le remblai est peu cohérent (matériaux sablo-graveleux) : en effet, le colmatage progressif des vides par les particules de sable et par l'affaissement naturel de ces matériaux évite la formation de galeries franches. De plus, les propriétés drainantes caractérisant ce type de matériaux ne sont pas fortement modifiées par les racines décomposées ; le risque de renard hydraulique est relativement peu augmenté. Par contre, dans les matériaux fins et cohésifs, les galeries laissées par les racines pourries sont durables et contribuent au risque de renard hydraulique.

Conclusions et perspectives

Acquisition de données

MÉTHODES DESTRUCTIVES

Les relevés manuels constituent une technique relativement longue (temps de saisie des mesures *in situ* et retranscription informatique) mais néanmoins précise et efficace. La saisie manuelle des coordonnées spatiales, dans le but de reconstituer l'architecture 3D des systèmes racinaires, est une technique fastidieuse et très peu précise sans la mise en place d'un système de référencement relatif complet.

La numérisation laser des systèmes racinaires par la méthode laser est rapide et précise. Cependant, l'exploitation des données, dans le cadre de la modélisation architecturale 3D, est complexe et passe par la vectorisation manuelle ou le maillage automatique des informations. Les nuages de points étant relativement diffus, les techniques automatisées semblent difficiles à mettre en œuvre, tandis que les méthodes de maillage manuelles sont extrêmement chronophages. Les moyens et les outils nécessaires au traitement de ces données sont donc encore en cours d'exploration.

Le digitaliseur est la méthode la plus perfectionnée et adaptée pour l'étude des systèmes racinaires, notamment sur le plan de la caractérisation architecturale.

MÉTHODES NON DESTRUCTIVES

Le radar est une technique facile et rapide à mettre en œuvre mais qui fournit des résultats de faible précision concernant la détection et la localisation des systèmes racinaires dans le sol.

La recherche d'autres méthodes non destructives permettant d'évaluer la position et la distribution des réseaux de racines dans les ouvrages hydrauliques en remblai (fortes contraintes liées aux matériaux constitutifs et à la présence/absence d'eau...) est primordiale. Certaines pistes sont en cours de réflexion, telles que les techniques de traçage à base de radio-isotope ou la caractérisation des propriétés électriques des racines.

Expérimentation sur le pourrissement des racines

La date de mort exacte des arbres est souvent inconnue et non répertoriée par les gestionnaires de digues. De plus, même avec des entretiens réguliers, les arbres survivent parfois pendant des

années après leur coupe grâce à des petits rejets qui conservent vivante une partie des racines. Une expérimentation en conditions contrôlées semble une solution adaptée pour tenter de répondre à cette problématique.

Un dispositif tout à fait original a été mis en place en avril 2008 lors d'un chantier d'étude des systèmes racinaires sur les digues de l'Isère. Les objectifs sont d'observer l'évolution du pourrissement, d'évaluer la vitesse et le pic de décomposition des racines en fonction de l'espèce, du diamètre et des conditions environnementales. L'expérimentation est prévue sur une période minimale de dix à quinze ans. Du point de vue méthodologique, le dispositif a été enterré à 50 cm de profondeur (zone naturelle de concentration maximum des racines) au sein d'une digue de protection contre les inondations. Deux cent échantillons de racines fraîchement coupées, de différents diamètres et de différentes espèces, ont été marqués, pesés et mesurés. Un premier déterrage aura lieu au

bout de deux à trois ans (observations, mesures, suivi de l'évolution, caractérisation des agents entrant dans la décomposition du bois) à la suite duquel les dates des prochains déterrages seront déterminées.

Étudier et cerner le risque que présente la partie souterraine des arbres pour les ouvrages hydrauliques en remblai nécessite de poursuivre et répéter les travaux de description et de caractérisation des systèmes racinaires, sur divers types de digues (dimension et forme, types de matériaux, structure interne), sur des individus d'espèces et d'âges variés, dans différentes situations (positions sur la digue et à ses abords) et conditions hydriques (climat, position de la nappe).

Les résultats exposés ici seront complétés et affinés au fur et à mesure de l'avancement des travaux de recherche dans le cadre d'une thèse en cours sur « L'enracinement des arbres dans les digues ». □

Remerciements

Nous remercions chaleureusement Rémi Taisant et Julien Nicolas (Compagnie nationale du Rhône) pour leur relecture attentive de cet article, ainsi que la Compagnie nationale du Rhône et l'Association départementale Isère-Drac-Romanche.

Résumé

Au même titre que les conduites traversantes ou les terriers de rongeurs, les racines d'arbres sont susceptibles de générer des phénomènes d'érosion menaçant l'intégrité des ouvrages hydrauliques en remblai. Après une courte revue bibliographique des techniques permettant l'étude des caractéristiques de l'enracinement des arbres, cet article présente l'état d'avancement des travaux de recherches sur le développement des systèmes racinaires d'essences ligneuses dans les digues. Les méthodes employées et les résultats obtenus en termes de connaissances sur les racines et de risques associés à la présence de la partie souterraine des arbres dans les remblais sont présentés.

Abstract

As well as the crossing pipes or the burrows of rodents, the roots of trees are likely to generate erosions phenomena threatening earth dykes and dams integrity. After a short bibliographical review concerning devices and techniques available in woody roots plants studies, this paper presents the researches state of progress about the development of woody root systems in dikes. Methods employed and results obtained in terms of knowledge on the roots and risks associated with the presence of the underground part of the trees in the embankments are presented.

Bibliographie

- ABERNETHY, B., RUTHERFURD, I.-D., 2000a, Does the weight of riparian trees destabilize riverbanks ?, *Regulated rivers : research & management*, vol. 16, p. 565-576.
- ABERNETHY, B., RUTHERFURD, I.-D., 2000b, The effect of riparian tree roots on the mass-stability of riverbanks, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 25, p. 921-937.
- ATGER, C., 1991, L'architecture racinaire est-elle influencée par le milieu ?, *L'arbre, biologie et développement*, numéro hors-série, p. 71-84.
- ATGER, C., EDELIN, C., 1994, Stratégie d'occupation du milieu souterrain par les systèmes racinaires des arbres, *Écologie*, vol. 49, p. 343-356.
- BUTNOR, J., DOOLITTLE, J., KRESS, L., COHEN, S., JOHNSEN, H., 2001, Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States, *Tree Physiology*, vol. 21, p. 1269-1278.
- CERMAK, J., HRUSKA, J., MARTINKOVA, M., PRAX, A., 2000, Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetrating radar and sap flow techniques, *Plant and Soil*, vol. 219, p. 103-116.
- CHANDIOUX, O., RIPERT, C., VENNETIER, M., ESTÈVE, R., 2003, *Étude de la végétation des digues du Rhône : étude des systèmes racinaires*, CNR, Cemagref, Aix-en-Provence, 10 p.
- CHANDIOUX, O., VENNETIER, M., ESTÈVE, R., RIPERT, C., 2005, *Étude de la végétation des digues du Rhône : étude des systèmes racinaires*, CNR, Cemagref, Aix-en-Provence, 9 p.
- COSTA, A., PEREIRA, H., 2006, Decision Rules for Computer-Vision Quality Classification of Wine Natural Cork Stoppers, *American Journal of Enology and Viticulture*, vol. 57, n° 2, p. 210-190.
- DALY, F., CHAPITAL, L., PERSONNE, C.-D.-L., 2005, État des lieux patrimonial des digues de canaux de navigation en France, *Ingénieries-EAT*, numéro spécial « Sécurité des digues fluviales et de navigation », p. 23-30.
- DANJON, F., BARKER, D., DREXHAGE, M., 2006, Analysis of 3D structural root architecture data of trees grown on slopes, *Structural root architecture on slopes*, p. 1-33.
- DANJON, F., BARKER, D., DREXHAGE, M., STOKES, A., 2008a, Using 3D plant root architecture in models of shallow slope stability, *Structural root architecture on slopes*, numéro special issue, p. 43.
- DANJON, F., BERT, D., GODIN, C., TRICHET, P., 1999b, Structural root architecture of 5-year-old Pinus pinaster measured by 3D digitising and analysed with AMAPmod, *Plant and Soil*, vol. 217, p. 49-63.
- DANJON, F., REUBENS, B., 2008b, 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*, p. 35.
- DANJON, F., SINOQUET, H., GODIN, C., COLIN, F., DREXHAGE, M., 1999a, Characterisation of structural tree root architecture using 3D digitising and AMAPmod software, *Plant and Soil*, vol. 211, p. 241-258.
- DOIRAT, G., RIPERT, C., 2003, *Étude du plan de gestion de la végétation arborée des digues de l'Isère*, AD Isère, Cemagref, Aix-en-Provence, 76 p.
- DUPUY, L., FOURCAUD, T., STOKES, A., 2005, A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension, *European Journal of Soil Science*, vol. 56, n° 3, p. 319-327.

EDMONDS, R.-L., VOGT, D.-J., SANDBERG, D.-H., DRIVER, C.-H., 1986, Decomposition of Douglas -fir and red alder wood in clear cuttings, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 16, p. 822-831.

FOURCAUD, T., DUPUY, L., SELIER, D., ANCELIN, P., LAC, P., 2004, Analysis of the relationship between tree structure and biomechanical functions, in : *4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models*, LRBB, UMR CNRS, INRA, Montpellier, France, p. 302-306.

FOUSSADIER, R., 2003, Les systèmes racinaires des arbres de la ripisylve : effets des contraintes physiques et exemples, in : *Les forêts riveraines des cours d'eau, écologie, fonctions et gestion*, Éd. IDF, Paris, p. 124-133.

GÄRTNER, H., DENIER, C., 2006, Application of a 3D Laser scanning device to acquire the structure of whole root systems - A pilot study, *Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology*, vol. 4, p. 288-294.

GODIN, C., COSTES, E., CARAGLIO, Y., 1997a, Exploring plant topological structure with the AmapMod software : an outline, *Silva Fennica*, vol. 31, n° 3, p. 355-366.

GODIN, C., GUÉDON, Y., COSTES, E., CARAGLIO Y., 1997b, Measuring and analysing plants with the Amapmod software, *Advances in computational life science*, p. 53-84.

LEE, P., STURGESS, K., 2001, The effects of logs, stumps, and root throws on understory communities within 28-year-old aspendominated boreal forests, *Canadian Journal of Botany*, n° 79, p. 905-916.

LONGUETAUD, F., SABATIER, R., NEPVEU, G., 2001, Identification des critères de qualités déterminant les aptitudes à l'emploi de grume de Hêtre par un panel de professionnels, DEA de Biostatistiques, ENSAM Montpellier et Université de Montpellier II.

LORENZO, H., ARIAS, P., 2005, A Methodology for Rapid Archaeological Site Documentation Using Ground-Penetrating Radar and Terrestrial Photogrammetry, *Geoarchaeology : An International Journal*, vol. 20, n° 5, p. 521-535.

MARTINIS, R., SOCCO, L., SAMBUELLI, L., NICOLOTTI, G., SCHMITT, O., BUCUR, V., 2004, Tomographie ultrasonore pour les arbres sur pied, *Annals of Forest Science*, vol. 61, p. 157-162.

MÉRIAUX, P., TOURMENT, R., WOLFF, M., 2005, Le patrimoine de digues de protection contre les inondations en France d'après la base de données nationales des ouvrages, *Ingénieries-EAT*, numéro spécial « Sécurité des digues fluviales et de navigation », p. 15-21.

NILAWEEERA, N., NUTALAYA, P., 1999, Role of tree roots in slope stabilisation, *Bulletin of engineering geology and the environment*, vol. 57, p. 337-342.

NORRIS, J., GREENWOOD, J., 2003, Root reinforcement on unstable slopes in Northern Greece and Central Italy, in : *An International Conference on Problematic Soils*, Nottingham, United Kingdom, p. 8.

REUBENS, B., POESEN, J., DANJON, F., GEUDENS, G., MUYS, B., 2007, The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture : a review, *Trees*, vol. 21, p. 385-402.

SANDSTROM, F., PETERSSON, H., KRUYSS, N., STAHL, G., 2007, Biomass conversion factors (density and carbon concentration) by decay classes for dead wood of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula spp.* in boreal forests of Sweden, *Forest ecology and management*, n° 243, p. 19-27.

SINOQUET, H., RIVET, P., 1997a, Measurement and visualization of the architecture of an adult tree based on a three-dimensional digitising device, *Trees*, vol. 11, p. 265-270.

SINOQUET, H., RIVET, P., GODIN, C., 1997b, Assessment of the three dimensional architecture of walnut trees using digitising, *Silva Fennica*, vol. 31, n° 3, p. 265-273.

STOKES, A., FOURCAUD, T., HRUSKA, J., CERMAK, J., NADYEZHDHINA, N., NADYEZHDIN, V., PRAUS, L., 1999a, An evaluation of different methods to investigate root systems architecture of urban trees *in situ* : I ground penetrating radar, *Journal of Arboriculture*, vol. 28, p. 1-9.

STOKES, A., 1999b, Strain distribution during anchorage failure of *Pinus pinaster Ait.* at different ages and tree growth response to wind-induced root movement, *Plant and Soil*, vol. 217, p. 17-27.

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*, vol. 19, p. 374-384.

TOBIN, B., BLACK, K., MCGURDY, L., NIEUWENHUIS, M., 2007, Towards a Methodology for Coarse Woody Débris C-stock Estimation, *School of Biology and Environment Science*, Dublin, p. 1-27.

WATSON, A., PHILLIPS, C., MARDEN, M., 1999, Root strength, growth, and rates of decay : root reinforcement changes of two tree species and their contribution to slope stability, *Plant and Soil*, vol. 217, p. 39-47.

WIELOPOLSKI, L., HENDREY, G., DANIELS, J., MCGUIGAN, M., 1999, Imaging Tree Root Systems In Situ (GPR), Brookhaven National Laboratory, Departement of Applied Sciences, p. 1-5.

ZANETTI, C., 2007, *L'enracinement des arbres dans les digues : morphologie des systèmes racinaires - relation avec l'érosion*, Cemagref, Université de Provence 1, 68 p.