

LISTE DES PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES REALISEES DANS LE CADRE DE LA THESE

Cette thèse est basée sur 7 articles scientifiques ou techniques, numérotés de 0 à VI (cf. liste ci-dessous), publiés, acceptés, soumis ou à soumettre dans des revues à comité de lecture. Le premier n'est pas intégré en tant que tel dans la thèse car il présente des connections avec plusieurs chapitres, mais il constitue le fond de l'état de l'art.

-
0. **Zanetti C., Vennetier M., Mériaux P., Royet P., Dufour S., Provansal M.** (2008) L'enracinement des arbres dans les digues en remblai : étude des systèmes racinaires et impacts sur la sécurité des ouvrages, *Ingénieries EAT*, p 49-57.
 - I. **Zanetti C., Vennetier M., Mériaux P., Royet P., Dufour S., Provansal M.** (à soumettre) Trees Root systems structure on earth dikes, *River Research and Applications* (IF : 1,9).
 - II. **Zanetti C., Blanc G., Vennetier M., Mériaux P., Danjon F., Provansal M.** (à soumettre) Tree root typology: a case study on dikes, *Trees – Structure and function* (IF : 1,6).
 - III. **Zanetti C., Guibal F., Brugier M., Vennetier M., Mériaux P., Provansal M.** (2010) Relation entre l'âge et le diamètre de racines prélevées sur des digues de protection contre les inondations, *Collection EDYTEM*, n°11, p115-122.
 - IV. **Zanetti C., Vennetier M., Mériaux P., Ferrat S., Provansal M.** (à soumettre) Tree roots decay in earth dykes *Canadian Journal of Forest Research* (IF : 1,4) or *Journal of Experimental Botany* (IF : 4,0).
 - V. **Zanetti C., Weller A., Vennetier M., Mériaux P., Provansal M.** (accepté le 7 septembre 2010) Detection of buried tree root samples by electrical measurements, *Plant and Soil* (IF 1.9)
 - VI. **Zanetti C., Mériaux P. Royet P., Vennetier M., Provansal M.** (à soumettre) Woody vegetation on earth dikes: risks assessment and management solutions, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*

Communications

- **Zanetti C., Vennetier M., Mériaux P., Royet P.** (2008) Rooting of trees in earth dikes morphology of tree root systems and risks for embankments, Poster presentation, CostE38 « Woody roots processes » Lisbon, 16-20 Mai 2008.
- **Zanetti C., Blanc G., Vennetier M., Mériaux P., Royet P., Provansal M.** (2009) Tree root systems architecture in earth dike, RootRap Symposium, Oral presentation, Vienna, 2-4 Septembre 2009.
- **Zanetti C., Weller A., Vennetier M., Mériaux P., Royet P., Provansal M.** (2009) Detection of buried tree root samples by electrical measurements, RootRap Symposium, Oral presentation, Vienna, 2-4 Septembre 2009.

- **Zanetti C., Guibal F., Brugier M., Vennetier M., Mériaux P., Royet P., Provansal M.** (2009) Relation entre l'âge et le diamètre de racines prélevées sur des digues de protection contre les inondations, Panorama de la Dendrochronologie en France, Présentation orale, Digne les Bains, 8-10 Octobre 2009.
- **Zanetti C., Vennetier M., Mériaux P., Royet P., Provansal M.** (2009) Managing woody vegetation on earth dikes: risk assessment and maintenance solutions, Oral presentation, EECA Congress, Paris, 2-4 Décembre 2009.
- **Zanetti C., Mériaux P., Vennetier M., Royet P.** (2010) Colonisation par les arbres des petits barrages ou digues de canaux en terre : diagnostic et consignes d'entretien au travers d'études de cas, Colloque CFBR-AFEID: «Sécurité des barrages et nouvelle réglementation française, Partage des méthodes et expériences», Lyon, 9 Novembre 2010.

Rapports d'expertise

Certains de ces rapports sont classés confidentiels ; le nom des aménagements hydrauliques étudiés n'est donc pas indiqué et est remplacé par « x » dans la liste ci dessous.

- **Zanetti C., Mériaux P., Vennetier M.** Etude de l'impact de l'enracinement des arbres sur la sécurité de la digue rive droite de l'aménagement de « x » : intervention sur le parement aval, Rapport d'étape Confidentiel, Cemagref / EDF, Janvier 2008, 30p.
- **Zanetti C., Mériaux P., Vennetier M.** Etude de l'impact de l'enracinement des arbres sur la sécurité de la digue rive droite de l'aménagement de « x » : Propositions de gestion de la végétation et d'interventions sur le parement aval, Rapport Confidentiel, Cemagref / EDF, Mars 2008, 7p.
- **Zanetti C., Mériaux P., Vennetier M.** Etude de l'impact de l'enracinement des arbres sur la sécurité de la digue rive droite de l'aménagement de « x » : Propositions de gestion de la végétation et d'interventions sur le parement amont, Rapport Confidentiel, Cemagref / EDF, Novembre 2008, 18p.
- **Zanetti C., Mériaux P., Vennetier M.** Etude de l'enracinement des arbres dans les digues à charge hydrauliques permanente des aménagements de « x » et « y », Rapport final, Cemagref / CNR, Mars 2009, 60p.
- **Zanetti C., Mériaux P., Vennetier M.** Etude de l'enracinement des arbres dans les digues de protection contre les crues de l'Isère, Cemagref / AD-IDR, Juillet 2009, 40p.
- **Zanetti C., Blanc G., Vennetier M., Mériaux P.** Etude de l'enracinement des arbres dans la digue de fermeture du barrage de « x », Rapport d'étape, Cemagref / EDF, Décembre 2009, 25p.
- **Mériaux P., Zanetti C., Vennetier M.** Note de recommandations pour la sécurisation du barrage de « x » vis-à-vis du développement de la végétation ligneuse sur le parement aval Cemagref / CG Isère, Juillet 2010, 23p.
- **Zanetti C. et al.** Guide technique de recommandations pour les gestionnaires (dans le cadre d'un CDD au Cemagref en 2011)

TABLE DES MATIERES

Avant propos	
Remerciements	
Liste des productions scientifiques et techniques	
Table des matières	

INTRODUCTION	1
Contexte	2
Problématique	3
PREMIERE PARTIE : ETAT DE L'ART	5
Sommaire	6
1. Ouvrages génie civil : les digues et les barrages	7
1.1. Définitions des ouvrages	7
1.2. Les modes d'érosion des ouvrages	8
2. Architecture des racines et structure des systèmes racinaires	9
2.1. Architecture des racines	9
2.1.1. Les fonctions des racines	9
2.1.2. Les caractéristiques architecturales	9
2.2. Structure des systèmes racinaires	10
2.2.1. Influence de l'espèce et du milieu	11
2.2.2. Influence des contraintes externes	12
2.3. Systèmes racinaires et terrains en pente	12
2.3.1. Rôle et impacts des racines.....	13
2.3.2. Relations entre propriétés des racines et stabilité des pentes.....	13
2.3.3. Relations entre structure racinaire, propriétés du sol et stabilité des pentes	14
3. Techniques d'acquisition et de traitement des données sur les systèmes racinaires	16
3.1. Le numériseur magnétique	16
3.1.1. Principe.....	16
3.1.2. Acquisition des données	16
3.1.3. Traitement et analyse des données.....	17
3.1.4. Utilisation et références	19
3.2. Le numériseur laser	20
3.2.1. Principe.....	20
3.2.2. Utilisation et références	20
3.3. La photogrammétrie	21
3.3.1. Principe.....	21
3.3.2. Utilisation et références	21
4. Méthodes d'étude de la croissance racinaire	22
4.1. Suivi du développement des systèmes racinaires	22
4.2. Modélisation de la croissance racinaire.....	23
4.3. Lecture des cernes de croissance annuels.....	24
5. Méthodes d'étude de la décomposition des racines	25
5.1. Identification du bois décomposé.....	25
5.2. Paramètres influençant la décomposition du bois	26
5.3. Protocoles de mesure du degré de décomposition	26
5.3.1. Evaluation qualitative du degré de décomposition	26
5.3.2. Evaluation quantitative du degré de décomposition	26
6. Techniques de détection des systèmes racinaires	28

6.1. Rayons X et traceurs.....	28
6.2. Le radar de sondage souterrain (GPR)	29
6.3. Les méthodes de détection électriques	30
7. Conclusion partielle	30
DEUXIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES.....	31
Sommaire	32
Préambule	33
1. Les sites d'étude	34
1.1. Localisation des sites d'interventions.....	34
1.2. Présentation et caractéristiques des sites	34
1.2.1. Donzère et Montélimar	35
1.1.2. Lyon.....	38
1.1.3. Pertuis	41
1.2.4. Grenoble	43
1.2.5. Cosne-sur-Loire	45
1.2.6. Castérino.....	47
1.2.7. Monjoux	50
2. Excavation et description des systèmes racinaires	51
2.1. Protocole sur le terrain	51
2.1.1. Identification des arbres.....	51
2.1.2. Extraction des systèmes racinaires	52
2.1.3. Prélèvement et analyse des matériaux	52
2.2. Recueil et analyse des données.....	53
3. Description et mesures des racines	54
3.1. Protocole de mesure	54
3.2. Analyse des données	55
4. Etude dendrologique.....	55
4.1. Plan d'échantillonnage	55
4.2. Protocole	55
5. Décomposition	55
5.1. Plan d'échantillonnage	55
5.1.1. Dispositif expérimental sur la digue de l'Isère	56
5.1.2. Dispositif expérimental sur la digue de Castérino	56
5.2. Protocole	58
5.2.1. Sur le terrain	58
5.2.2. Au laboratoire	61
6. Détection électrique.....	68
6.1. Plan d'échantillonnage	69
6.2. Protocole	69
7. Conclusion partielle	69
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION	71
Chapitre 1. Structure des systèmes racinaires.....	72
1.1. Présentation de l'article I	73
1.2. Article I : Tree root systems structure on earth dikes	74
1.3. Conclusions de l'article et perspectives	85

Chapitre 2. Architecture racinaire.....	87
2.1. Présentation de l'article II.....	88
2.2. Article II : Root systems architecture on dykes: a typology purpose	89
2.3. Conclusions de l'article et perspectives	104
Chapitre 3. Croissance racinaire.....	106
Préambule.....	107
3.1. Présentation de l'article III	107
3.2. Rappels des caractéristiques dendrologiques du bois	107
3.3. Article III: Caractérisation de la croissance racinaire d'essences ligneuses implantées sur des digues fluviales	111
3.4. Conclusions de l'article.....	119
3.5. Comparaison anatomique du bois de racines sur digues et sur sols de montagne	119
3.6. Perspectives.....	121
Chapitre 4. Décomposition racinaire.....	123
Préambule.....	124
4.1. Présentation du projet d'article IV.....	124
4.2. Projet d'article IV : Tree roots decay in earth dikes	125
4.3. Conclusions du projet d'article et perspectives	136
Chapitre 5. Détection des systèmes racinaires	
5.1. Présentation de l'article V	138
5.2. Rappels des propriétés électriques des matériaux.....	138
5.3. Article V: Detection of buried tree root samples by electrical measurements.....	140
5.4 Conclusions de l'article et perspectives	151
QUATRIEME PARTIE : SYNTHÈSE – RISQUES INDUITS POUR LES OUVRAGES ET PRECONISATIONS DE GESTION GENERALES....	153
Sommaire	154
Préambule.....	155
1. Risques induits pour les ouvrages hydrauliques liés à la présence d'arbres et de racines ligneuses	156
1.1. Typologie des risques.....	156
1.1.1. Les risques d'érosion interne	156
1.1.2. Les risques d'érosion externe	159

1.2. Les paramètres influençant le risque	160
1.2.1. Structure et architecture racinaires	160
1.2.2. Décomposition racinaire	161
1.2.3. Dimension de l'ouvrage.....	161
1.2.4. Nature des matériaux constitutifs du remblai	162
2. Premier recueil de recommandations de gestion ou de traitement de la végétation sur les ouvrages : vers un guide technique	162
2.1. Préconisations générales.....	162
2.2. Préconisations en fonction du type d'ouvrage hydraulique	163
2.2.1. Cas des digues à charge temporaire	163
2.2.2. Cas des digues à charge permanente.....	164
2.2.3. Synthèse des études de cas de la thèse.....	165
2.3. Préconisations de gestion applicables à court, moyen et long termes.	166
2.3.1. Entretien régulier réalisable à court terme. Interventions d'urgence	167
2.3.2. Reprise de l'entretien et travaux à moyen terme	168
2.3.3. Confortement de l'ouvrage à long terme	168
3. Conclusion et perspectives.....	169
 CONCLUSION GENERALE & PERSPECTIVES.....	 170
 Références bibliographiques.....	 175
Glossaire.....	181
Liste des sigles, figures, photographies et tableaux.....	182
Annexes.....	189
Résumé / Abstract	

INTRODUCTION

Contexte

La France compte aujourd'hui plus de 9 000 km de digues de protection contre les inondations fluviales ou maritimes, 6 700 km de voies d'eau navigables endiguées, plus de 1 000 km de digues d'aménagement hydraulique et de grands canaux d'irrigation, sans compter des dizaines de milliers de barrages. Dans leur grande majorité, ces ouvrages hydrauliques sont construits avec des remblais d'alluvions car de tous temps ce type de matériau s'est révélé économique. Les inondations qui ont affecté le sud de la France au cours des deux dernières décennies (Camargue 1993 et 1994, Alpes Maritimes 1994, Aude et Pyrénées orientales 1999, Gard 2002, basse et moyenne vallée du Rhône 2003, côte vendéenne 2010), ont mis en lumière les défaillances des digues et les conséquences désastreuses qui en ont découlé d'un point de vue sécuritaire et économique. A titre d'exemple, les récentes inondations dans le sud-est de la France (rupture de la digue d'Aramon en septembre 2002 et des digues de Fourques et du Nord d'Arles en décembre 2003) cumulent un coût de plusieurs milliards d'euros. Dans de nombreux des cas, les ruptures de digue sont imputables aux phénomènes d'érosion interne qui fragilisent peu à peu les ouvrages ou leur fondation. Notre patrimoine d'ouvrages hydrauliques contient des ouvrages d'âges extrêmement variés, certains datant d'avant la Révolution, et, comme ils sont en général en terre, ils ont bien souvent fourni les conditions idéales pour le développement d'une végétation arborescente, dense et ancienne lorsque l'entretien est déficient depuis de nombreuses années.

De nos jours, le nombre d'accidents mortels liés à des ruptures ou défaillances d'ouvrages (inondations de la Nouvelle Orléans aux USA lors de l'ouragan Katrina en août 2005, et en ce début d'année les inondations dans l'Ouest de la France au cours de la tempête Xynthia) justifie un regain d'études et ainsi que le renforcement récent de la réglementation française pour de tels ouvrages. On estime¹ que, parmi les quelque 6 000 km de digues de protection contre les inondations soumises à la réalisation d'ici 2014 d'une étude de dangers (classes A, B et C) en application de la nouvelle réglementation², seulement un tiers sont dans un état connu satisfaisant. Par différence, ce sont de l'ordre de 4000 km de digues qui nécessiteront, dans les cinq prochaines années, des investigations approfondies afin de s'assurer de leur sécurité et probablement des travaux de remise en état.

D'après un recensement récent des différentes causes de ruptures des digues fluviales allemandes, effectué en 2007 par le bureau d'étude « SCHOLZ & LEWIS mbH », 50% des accidents seraient liés à des phénomènes d'érosion interne, 30% seraient dus à des surverses et les 20% restant seraient imputables à la présence des arbres et/ou de leurs racines qui eux même favorisent d'ailleurs l'érosion interne.

L'enracinement des arbres dans les ouvrages en remblai, est une variable mal connue et soumise à controverse. En effet, au début du 20^{ème} siècle, des arbres étaient parfois plantés sur les digues pour renforcer et stabiliser les talus. Actuellement, les recommandations sécuritaires de gestion s'opposent à la présence d'essences ligneuses sur les ouvrages et préconisent le maintien d'un couvert herbacé ras. Ces consignes sont également valables en Allemagne, aux Pays-Bas, en Angleterre et aux Etats-Unis. Cependant, la nécessité d'intégration paysagère, la fonction d'accueil du public jouée par certaines digues en milieu urbain, ou parfois une carence d'entretien par les propriétaires qui, de bonne foi, ignorent les impacts négatifs occasionnés par la présence des racines dans les remblais d'ouvrage hydraulique, ont abouti au développement de véritables forêts sur de nombreuses digues.

¹ D'après la Base de Données BarDigues administrée par le Cemagref pour le compte du Ministère de l'Ecologie.

² Décret du 11/12/2007 sur la sécurité des ouvrages hydrauliques.

Dans un tel contexte contradictoire, la gestion de ces digues et barrages déjà boisés est difficile pour leurs propriétaires et est, par ailleurs, peu documentée.

Problématique

Situés par définition à proximité de milieux aquatiques, les ouvrages hydrauliques en remblai sont enclins à être colonisés par des espèces d'arbre hygrophiles et ce, en seulement quelques années.

Les propriétaires et gestionnaires d'ouvrages hydrauliques ont constaté que la présence d'essences ligneuses pose des problèmes de sécurité : les arbres et arbustes gênent la surveillance visuelle des ouvrages, favorisent la présence d'animaux fouisseurs qui creusent des terriers dans les remblais et, enfin, le développement et le pourrissement des systèmes racinaires sont des facteurs de fragilisation à court et moyen termes.

L'enracinement des arbres génère deux types de risques pour les digues :

- Premièrement, l'érosion interne, une des deux principales causes de rupture des ouvrages en remblai, 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, comme souvent sur les ouvrages à charge permanente. Ceci est particulièrement préoccupant lorsque le revêtement dégradé protège une structure d'étanchéité de l'ouvrage. Après pourrissement, les racines génèrent un risque de renard hydraulique du fait de la création de conduits favorisant la circulation de l'eau et pouvant éventuellement engendrer la formation d'une brèche par effondrement.

- Deuxièmement, l'érosion externe, qui se produit lors de l'ablation par le système racinaire d'une loupe de terre plus ou moins importante, consécutive à l'arrachement d'un arbre (chablis). Sur le talus côté fleuve ou canal, ces hétérogénéités de surface favorisent le développement de courants tourbillonnaires qui érodent le talus et peuvent le déstabiliser. En crête de digue, la loupe d'arrachement constitue un point bas favorisant les surverses, et, sur le talus du remblai, elle raccourcit le chemin hydraulique accroissant le gradient et le risque d'érosion interne.

L'importance du risque dépend (i) de la dimension de la partie aérienne de l'arbre (prise au vent - effet de levier) pour ce qui est de l'érosion externe, (ii) de la structure de l'enracinement de l'arbre (type d'architecture, volume, nombre, longueur et diamètre des racines) et (iii) des propriétés des matériaux constituant le corps de digue (résistance mécanique, sensibilité à l'érosion interne). La topographie de la digue et de son environnement joue également un rôle important : rapport « hauteur de la digue sur sa largeur à la base », pente des talus, proximité d'un escarpement en pied de talus (berge raide, talus de déblai, etc.).

Dans ce contexte, l'objectif principal de cette thèse est de contribuer à la compréhension du risque induit par les systèmes racinaires sur la structure et la durabilité des ouvrages hydrauliques en remblai.

Pour cela, diverses étapes sont nécessaires. Il s'agit :

- dans un premier temps, d'acquérir des connaissances sur la pénétration des systèmes racinaires dans les digues en caractérisant (i) la structure des souches d'espèces

représentatives de ces milieux, (ii) l'architecture et (iii) les modalités de croissance des racines ;

- dans un deuxième temps, de caractériser le phénomène de décomposition racinaire ;
- dans un troisième temps, d'identifier et évaluer des méthodes non destructives de détection des racines dans les digues ;
- enfin, (i) de répertorier les risques induits pour les ouvrages hydrauliques liés à la présence des systèmes racinaires dans les remblais et (ii) d'esquisser les préconisations de gestion appropriées aux différents types d'ouvrages et de situations.

Dans une **première partie**, ce manuscrit présentera un état de l'art des connaissances liées à la problématique de cette étude et aux différents thèmes abordés : (i) les structures génie civil que sont les digues et les barrages, (ii) les propriétés des systèmes racinaires et leurs moyens d'analyse aux différentes échelles d'observation - du système global à petite échelle, en passant par la racine, puis à grande échelle, au niveau des cernes de croissance -, (iii) la décomposition du bois des racines et (iv) les techniques de détection des systèmes racinaires.

La **seconde partie** présentera les matériels et méthodes mis en œuvre dans le cadre des recherches sur les différents thèmes d'étude. Cette partie sera synthétique et renverra, pour le détail, aux sections « Matériels et Méthodes » des articles exposés dans la partie suivante.

Dans la **troisième partie**, seront énoncés les résultats des travaux sous forme d'articles publiés, soumis ou à soumettre.

Enfin la **quatrième partie** présentera une synthèse des acquis scientifiques de la thèse, avec son application en termes de risques générés par les systèmes racinaires pour les ouvrages hydrauliques en remblai et les recommandations de gestion générales applicables aux digues et barrages boisés.

ETAT DE L'ART

SOMMAIRE

1. Ouvrages génie civil : les digues et les barrages	7
1.1. Définitions des ouvrages	7
1.2. Les modes d'érosion des ouvrages	8
2. Architecture des racines et structure des systèmes racinaires	9
2.1. Architecture des racines	9
2.1.1. Les fonctions des racines	9
2.1.2. Les caractéristiques architecturales	9
2.2. Structure des systèmes racinaires	10
2.2.1. Influence de l'espèce et du milieu	11
2.2.2. Influence des contraintes externes	12
2.3. Systèmes racinaires et terrains en pente	12
2.3.1. Rôle et impacts des racines	13
2.3.2. Relations entre propriétés des racines et stabilité des pentes	13
2.3.3. Relations entre structure racinaire, propriétés du sol et stabilité des pentes	14
3. Techniques d'acquisition et de traitement des données sur les systèmes racinaires	16
3.1. Le numériseur magnétique	16
3.1.1. Principe	16
3.1.2. Acquisition des données	16
3.1.3. Traitement et analyse des données	17
3.1.4. Utilisation et références	19
3.2. Le numériseur laser	20
3.2.1. Principe	20
3.2.2. Utilisation et références	20
3.3. La photogrammétrie	21
3.3.1. Principe	21
3.3.2. Utilisation et références	21
4. Méthodes d'étude de la croissance racinaire	22
4.1. Suivi du développement des systèmes racinaires	22
4.2. Modélisation de la croissance racinaire	23
4.3. Lecture des cernes de croissance annuels	24
5. Méthodes d'étude de la décomposition des racines	25
5.1. Identification du bois décomposé	25
5.2. Paramètres influençant la décomposition du bois	26
5.3. Protocoles de mesure du degré de décomposition	26
5.3.1. Evaluation qualitative du degré de décomposition	26
5.3.2. Evaluation quantitative du degré de décomposition	26
6. Techniques de détection des systèmes racinaires	28
6.1. Rayons X et traceurs	28
6.2. Le radar de sondage souterrain (GPR)	29
6.3. Les méthodes de détection électriques	30
7. Conclusion partielle	30

1. Ouvrages génie civil : les digues et les barrages

En France, il existe une grande variété de digues et de barrages en terre, qui s'explique par les différentes époques de construction, les différents matériaux utilisés dans leur édification, ainsi que par les modifications successives que les ouvrages ont connus depuis leur création (confortement, réparation, rehaussement...).

1.1. Définitions des ouvrages

Les barrages et les digues sont des ouvrages hydrauliques construits dans le but de stocker les eaux ou de se protéger de leurs effets. Les barrages sont implantés perpendiculairement au cours d'eau ou à l'écoulement alors qu'en général les digues le sont longitudinalement. Les digues se séparent alors en deux grandes familles : les digues à charge hydraulique permanente assurant le stockage ou le transport de l'eau et les digues de protection contre les inondations (Royet and Mériaux 1998).

- Les digues à charge hydraulique permanente correspondent principalement à des digues de navigation, de dérivation ou d'irrigation. On compte, pour les petits canaux de navigation, environ 10 ruptures par an sur les 6 700 km de canaux navigables (Daly et al. 2005). Il s'agit souvent de digues très hétérogènes, mal connues des gestionnaires d'ouvrages, à l'exception des digues récentes d'aménagements hydroélectriques (Rhône et Rhin).

- Les digues de protection contre les crues sont des ouvrages dont une partie est construite au-dessus du terrain naturel afin de contenir épisodiquement un flux d'eau supérieur à la moyenne (Mériaux et al. 2003). L'essentiel du parc de ce type de digues est ancien et leur constitution est généralement très mal connue par les gestionnaires sauf pour les quelques ouvrages ayant fait l'objet d'un diagnostic approfondi récent à l'appui de sondages géotechniques.

Les digues sont dans leur grande majorité réalisées en terre (ou remblai), s'agissant d'un matériau peu coûteux s'il est disponible à proximité de l'emprise des travaux et adapté à la construction d'ouvrages à long linéaire (terrassements en déblai-remblai). Deux types de conception sont possibles :

- La digue homogène : le même matériau de remblai assure les fonctions d'étanchéité et de stabilité mécanique de l'ouvrage (exemples : digues de Camargue en limon étanche, digues d'aménagement hydroélectrique du Rhône en matériau semi-perméable). Une couche imperméable ou non (par exemple : des dalles en béton ou un perré) peut venir s'ajouter en amont (côté cours d'eau ou canal) à ce type de configuration pour renforcer l'étanchéité ou protéger de l'érosion externe.

- La digue zonée : un noyau compacté argileux ou limoneux constitue la barrière imperméable de l'ouvrage, située au centre de l'édifice constitué de matériaux plus perméables (matériaux sablo-graveleux, enrochements,) disposés en recharges. On se rapproche alors d'une conception de type grand barrage en remblai.

1.2. Les modes d'érosion des ouvrages

L'érosion ne se développe que si deux conditions sont réunies : l'arrachement des particules et leur transport (Blais 2005). Il existe différents type d'érosion pour les ouvrages :

- L'érosion externe, visible à l'œil nu, est le résultat de l'entraînement des particules d'un sol sous l'action d'un écoulement de surface (courant hydraulique, ruissellement) ;
- L'érosion interne se caractérise par l'entraînement des particules d'un sol sous l'action de l'écoulement qui le traverse (écoulement souterrain). L'érosion interne est un terme général qui rassemble différents phénomènes : renard hydraulique (érosion de conduit ou de fissure), érosion régressive, érosion de contact, suffusion (Tableau I.1).

Schéma	Type	Description
	Érosion externe	Entraînement des particules de la surface du sol sous l'action du ruissellement de l'eau
	Érosion interne de conduit ou de fissure	Entraînement des particules des parois d'un conduit ou d'une fissure dans le sol
	Érosion interne régressive (généralisée ou locale au fond d'un conduit)	Entraînement des particules de la paroi aval ou du fond d'un conduit sous une surface cohésive ou rigide
	Érosion interne de contact (entre un gravier et un limon)	Entraînement des particules d'un sol fin le long de son contact avec un sol grossier
	Suffusion, (suffosion) ou instabilité interne d'un sol ou érosion volumique	Entraînement des particules fines à travers les vides des particules grossières d'un sol

Il y a donc deux types de transports dans le cas de l'érosion interne : le transport concentré dans un conduit (renard) et le transport diffus dans l'espace poreux interparticulaire. Le premier mode de transport des particules est le plus dangereux, il peut conduire très rapidement à la rupture.

Les principales causes de l'érosion interne sont les conduites rigides ou zones de perméabilité dans les remblais, les terriers de fouisseurs, les tassements différentiels, les zones de perméabilité dans les sols de fondation et les racines des arbres qui trouvent sur les digues en terre des conditions favorables pour s'installer.

Les racines ligneuses vivantes ou décomposées constituent en effet des zones d'hétérogénéités perméables au sein des remblais.

Tous ces facteurs tendent à concentrer les écoulements et à augmenter leur vitesse dans la zone de remblai où ils agissent. Plus la vitesse est forte, plus le risque d'une amorce d'érosion interne est élevé.

Tableau I.1 : Les différentes conditions d'érosion (Fry, 2010)

La surveillance régulière des digues et le diagnostic approfondi des mauvais fonctionnements éventuels sont nécessaires. Plusieurs guides ont été édités afin d'aider les gestionnaires dans cette tâche de surveillance et d'entretien de leurs ouvrages (BAW 2005; DVWK 1993; Mériaux et al. 2006; TAW 1994).

Par ailleurs, des documents techniques existent et énoncent des recommandations sécuritaires basées sur le retour d'expérience des gestionnaires (FEMA 2005; STOWA 2000; TAW 1999; US-ARMY 2008) mais il n'y a pas de publication scientifique sur les impacts de l'enracinement des arbres dans les ouvrages hydrauliques. Il était donc pertinent d'entamer une étude globale sur le développement des systèmes racinaires ligneux dans les digues et les barrages, abordant les problématiques des impacts liés aux arbres vivants, aux arbres morts (racines en décomposition) et à la question de l'emploi de méthodes non destructives de détection des systèmes racinaires.

2. Architecture des racines et structure des systèmes racinaires

Nous avons pu distinguer deux échelles d'observation des systèmes racinaires : l'architecture racinaire et la structure des enracinements. Dans le premier cas, il s'agit de la morphologie à l'échelle de la racine, dans le second cas, de la morphologie de la souche dans sa globalité.

2.1. Architecture des racines

A l'échelle de la racine, la mise en place de l'architecture racinaire est le résultat des processus de croissance primaire (en longueur) et secondaire (en diamètre), de ramification (production d'axes secondaires) et de réitération (duplication des racines) (Atger 1991; Atger and Edelin 1994b; Barthélémy et al. 1995). L'alimentation du système racinaire par le houppier permet l'allongement subterminal des racines (organogénèse) tandis que la croissance en épaisseur est assurée par les radicelles, à l'autre extrémité du système (Drenou 2006). Les racines se caractérisent donc par des propriétés architecturales et fonctionnelles (Atger 1991).

2.1.1. Les fonctions des racines

Les deux fonctions principales des racines sont l'ancrage de l'arbre et l'acquisition des ressources du sol nécessaire à la survie du végétal (eau et ions) (Atger and Edelin 1994a; Fitter 2002).

On distingue trois types de racines chez l'arbre mature : (i) les racines ligneuses principales (ou charpentière) qui assurent l'ancrage de l'arbre (résistance au vent et aux éventuels courants hydrauliques et à la force de gravité), (ii) les racines ligneuses de prospection qui jouent un rôle d'exploration du sol (recherche des ressources disponibles) et (iii) les racines non ligneuses (radicelles et mycorhizes*) qui assurent l'absorption et le stockage de l'eau et des éléments nutritifs. Toutes ces racines ont, par ailleurs, une fonction commune : la conduction, c'est-à-dire le transport de la sève brute des racines vers la tige et, en retour, celle de la sève élaborée vers les racines (Drenou 2006).

2.1.2. Les caractéristiques architecturales

Les variables caractérisant l'architecture racinaire sont la topologie et la géométrie. La topologie se caractérise par la forme des embranchements et des connections 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. 1997).

De nombreuses caractéristiques sont identifiées afin de décrire l'architecture racinaire. Elles traduisent la morphologie, la dimension et l'organisation des racines. Les protocoles de description et de mesures - in situ et en laboratoire - exposés dans la littérature scientifique présentent des similitudes. Les informations extraites de (Böhm 1979; Danjon et al. 1999a; Reubens et al. 2007) représentent un inventaire complet des différentes caractéristiques à prendre en compte (Tableau I.2). L'analyse du nombre, du diamètre, de la longueur et du volume des racines en fonction de la profondeur et de la distance radiale par rapport à la souche ou encore du nombre, de la longueur des racines en fonction de leur inclinaison et ordre hiérarchique, sont des relations logiques qui ont été mises en évidence. D'après Danjon et al. (1999), le nombre, le diamètre, la longueur et le volume des racines sont fonctions de la distance par rapport à la souche.

Extension radiale max (cm)
Profondeur max (cm)
Longueur des racines, inter embranchement et longueur totale (cm)
Diamètre des racines par ordre* à différentes longueur (cm)
Nombre de racines par ordre* et nombre total
Proportion de racines horizontales (< 30°)
Proportion de racines verticales (> 50°)
Proportion de racines obliques (entre 30 et 50°)
Proportion de racines profondes (+110cm)
Proportion de racines superficielles (-30 cm)
Inclinaison (°) : angle entre la racine mesurée et le plan horizontal (horizontale, oblique ou verticale)
Nombre de fourches : nombre total de bifurcations
Diamètre des racines au point de rupture (cm)
Volume et diamètre du pivot
Volume des racines par classes de diamètre (cm ³) (soit par déplacement d'eau, soit avec $V = L \times CSA$ calculé avec diamètre moyen)
CSA "Cross Sectional Area" (cm ²) : surface d'une racine vue en coupe
RAR "Root Area Ratio" (cm ²) : surface totale racinaire vue en coupe par classes de diamètres** (CSA x nombre de racines)
RD "Root Density" (kg/m ³) : masse sèche des racines contenus dans le volume de sol prospecté
RLD "Root Length Density" (cm/cm ³) : longueur de racines contenue dans le volume de sol prospecté

* Ordre (ou axe) : niveau d'embranchement (pivot : ordre 1, racines partant du pivot : ordre 2...)

** {fine / mince / moyenne / large / très large : 2<5<10<20 mm}

Tableau I.2 : Caractéristiques architecturales des racines
d'après Böhm, 1979 ; Danjon et al., 1999 ; Reubens et al., 2007.

2.2. Structure des systèmes racinaires

Des références bibliographiques concernant les systèmes racinaires existent principalement dans les domaines agronomiques, forestiers, montagnards et alluviaux (Abernethy and Rutherford 2000b; Norris and Greenwood 2003; Reubens et al. 2007). Les classifications des systèmes racinaires sont généralement basées sur la structure globale des souches et mettent en avant les déterminismes liés à l'espèce végétale (Atger 1991; Atger and Edelin 1994a), l'adaptation des systèmes au milieu (Fitter and Stickland 1991; Foussadier 2003), et à la pente (Danjon et al. 2008; Fourcaud et al. 2004; Nilaweera and Nutalaya 1999; Norris and Greenwood 2003).

Les systèmes racinaires sont parfois classés en deux groupes :

- soit en fonction de la profondeur d'enracinement : les systèmes superficiels (0-60 cm) et profonds (60 à 400 cm) (Lucot and Bruckert 1992) ;
- soit en fonction de leurs caractéristiques topologiques : les systèmes « dichotomiques » et « en arrête de poisson » (Fitter 2002).

Plus souvent, les systèmes racinaires sont différenciés en fonction de leur morphologie et du type de racines prédominant. Les trois groupes les plus couramment décrits sont (i) les systèmes en cœur (ou fasciculés), (ii) les systèmes « en plaque » (ou traçants) et (iii) les systèmes pivotants (Köstler et al. 1968). Cette dernière classification est fréquemment utilisée dans la littérature scientifique (Dupuy 2003; Stokes and Mattheck 1996).

2.2.1. Influence de l'espèce et du milieu

D'après Atger (1991), l'architecture des systèmes racinaires est prédéterminée par des lois endogènes dépendant de chaque espèce. Cependant, les propriétés physico-chimiques du sol (texture, humidité, oxygénation et fertilité) affectent les caractéristiques biométriques des racines : extensions horizontale et verticale, vitesse d'allongement, densité et biomasse (Atger 1991; Atger and Edelin 1994b; Foussadier 2003).

Atger (1991) a étudié le rôle que joue le milieu (propriétés du substrat) dans la définition de la nature et des modalités d'agencement des composants du système racinaire par le biais de l'analyse architecturale. La comparaison d'individus d'espèce et d'âge identiques, sur différents sites, permet de déterminer les mécanismes de développement inhérents à l'espèce et ceux imputables au milieu. L'étude de plusieurs espèces d'arbres d'âge identique dans un même site révèle que leurs systèmes racinaires ne présentent ni la même forme, ni la même extension. Cette analyse architecturale et anatomique a démontré que le développement des systèmes racinaires répond à un plan extrêmement précis, caractéristique de l'espèce, dont l'expression est progressive au cours de l'ontogénèse (Figure I.1). Le milieu peut agir à tout instant comme un facteur limitant le déroulement de l'activité des méristèmes* et peut induire l'interruption ou l'impossibilité de développement d'un axe. D'après Atger, le milieu a une action quantitative et non qualitative sur le développement du système racinaire.

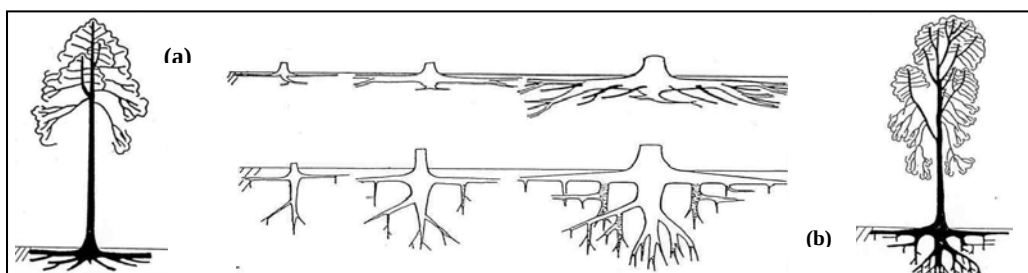


Figure I.1 : Architecture racinaire de deux espèces arborescentes à trois stades de leur développement. (a) *Laetia procera* : le pivot a une extension verticale limitée, des racines horizontales à développement tardif (en noir) recolonisent la proximité du tronc (réitération proleptique). (b) *Goupia glabra* : une couronne de pivots surnuméraires (en gris) se développent progressivement à partir des racines charpentières, au cours de la croissance de l'arbre. Ces deux espèces poussant dans le même milieu, en Guyane, ont des aptitudes de croissance et des modalités de développement différentes (Atger 1991).

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 I.2).

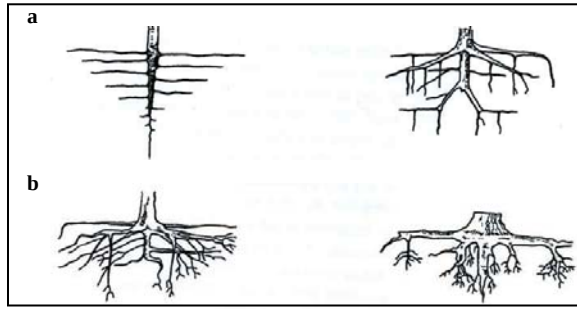


Figure I.2 : Architecture du système racinaire des espèces ligneuses en fonction des contraintes locales. (a) En l'absence de contraintes au niveau du substrat, développement vertical du système racinaire et mise en place d'un pivot. (b) Dans des substrats à fortes contraintes hydriques (anoxie) et granulométriques, développement de ramifications latérales et mise en place d'un système racinaire de type traçant (Foussadier 2003).

La disponibilité en eau (positions de la nappe phréatique) et les paramètres pédologiques sont 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 I.3).

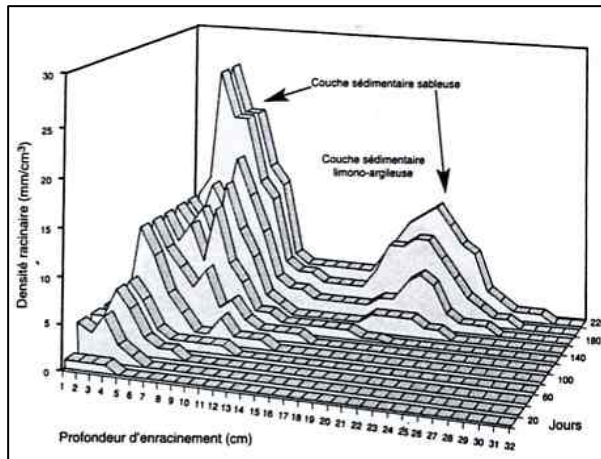


Figure I.3 : Evolution de la densité racinaire du saule blanc dans un sol stratifié. L'alternance de couches sédimentaires aux propriétés différentes, caractéristique des milieux alluviaux, dicte la répartition des racines, qui se développent préférentiellement dans les sédiments de plus grande porosité (meilleure aération) (Foussadier 2003).

2.2.2. Influence des contraintes externes

Les contraintes externes (vent ou crues) induisent également une adaptation de la morphologie des systèmes racinaires (Dupuy et al. 2005b; 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 and Rutherford 2000b; Danjon et al. 2008; Di-Iorio et al. 2005). Les systèmes racinaires d'essences arborées influencent par ailleurs la stabilité des terrains pentus.

2.3. Systèmes racinaires et terrains en pente

Différents paramètres peuvent être pris en compte pour définir le rôle des arbres et de leur système racinaire sur la stabilisation des terrains en pente. La quantification des interactions entre la végétation et les phénomènes d'érosion est difficile du fait du manque de connaissances en ce qui concerne la façon dont les racines affectent les processus mécaniques et hydrologiques (Abernethy and Rutherford 2000b; Pollen 2007; Simon and Pollen 2004). Cette quantification doit prendre en compte certaines caractéristiques du système racinaire telles que l'architecture et la distribution des racines, leur résistance à la traction (capacité d'extension) et la forme des embranchements (Abernethy and Rutherford 2001; Nilaweera and Notalaya 1999; Reubens et al. 2007).

Qu'il s'agisse des ouvrages hydrauliques en remblai (barrages, digues de canaux et digues fluviales) ou des berges (talus naturels bordant les cours d'eau), ces terrains plus ou moins

pentus et propices au développement de la végétation arborée, sont soumis à des phénomènes d'érosion hydraulique qui peuvent porter atteinte à leur stabilité. Cependant, dans le cas des ouvrages hydrauliques, les effets positifs de stabilisation des sols par les systèmes racinaires sont rarement pris en compte, étant donné que leurs pentes sont calibrées pour être stables. Ils peuvent par contre l'être pour la tenue des berges situées à proximité du pied de digue côté cours d'eau.

2.3.1. Rôle et impacts des racines

Le sol, support de l'appareil racinaire, et sa structure sont directement et indirectement influencés par la présence des systèmes racinaires. La caractérisation des effets des racines sur la stabilisation des pentes et le contrôle de l'érosion des terrains a fait l'objet de nombreuses publications (Abernethy and Rutherford 1998; 2000a; 2001; Coutts et al. 1999; Danjon et al. 2008; Dupuy et al. 2005a; 2005b; Fourcaud et al. 2004; Nilaweera and Nulalaya 1999; Norris and Greenwood 2003; Pollen 2007; Reubens et al. 2007; Schmidt et al. 2001; Watson et al. 1999). Ces différents auteurs ont décrit les interactions entre végétation et stabilité des pentes qui dépendent des effets hydrologiques et mécaniques qu'ont les plantes sur le sol, et dont les impacts peuvent être positifs ou négatifs (Tableau I.3).

S'il est admis par la plupart des auteurs cités précédemment que les arbres et leurs racines traçantes peu profondes sont très efficaces dans la lutte contre l'érosion superficielle, l'efficacité des systèmes racinaires contre les glissements de terrain est plus controversée (Mazet-Brachet 1984). Celle-ci dépend des racines verticales ou obliques profondes qui s'opposent au mouvement du sol lorsqu'elles traversent le plan de glissement. Ainsi, l'effet que peuvent avoir ces racines dépend de la position et de la profondeur de la surface de rupture.

	Impacts positifs	Impacts négatifs
Effets hydrologiques	réduction du volume et de la vitesse des écoulements de surface (interception)	augmentation de la porosité du sol (l'infiltration)
	réduction de la teneur en eau du sol (absorption - max en été)	diminution de l'absorption d'eau en hiver
Effets mécaniques	augmentation de la rugosité (friction)	poids des arbres (gravité)
	augmentation de la cohésion du sol (renforcement)	prise au vent (décohésion)

Tableau I.3 : Impacts des arbres et de leur système racinaire sur la stabilité des terrains (Nilaweera and Nulalaya, 1999 ; Abernethy and Rutherford, 2000, 2001 ; Watson et al, 1999 ; Schmidt et al., 2001 ; Norris and Greenwood, 2003 ; Danjon et al., 2008 ; Pollen, 2007 ; Reubens et al., 2007).

2.3.2. Relations entre propriétés des racines et stabilité des pentes

Si globalement, la présence de racines améliore la stabilité des terrains, il est possible d'observer des nuances dans ce renforcement en fonction des caractéristiques et propriétés des racines. Les principaux facteurs influençant la stabilité des pentes semblent être le nombre, la taille, la résistance à la traction et la flexibilité des racines traversant le plan de glissement. Les racines verticales des arbres induisent une augmentation de la résistance au cisaillement en profondeur, tandis que les racines horizontales favorisent le renforcement de la partie superficielle du sol (Reubens et al. 2007). Le renforcement racinaire maximum s'opère au niveau de la ZRT « Zone of Rapid Taper », partie du système racinaire localisée dans un rayon équivalent à deux fois le diamètre de la souche au collet et au dessus de 50 cm de profondeur. Cette zone est caractérisée par une augmentation du diamètre et de la rigidité des racines au départ de la souche (Danjon et al. 2008; Danjon and Fourcaud 2009). Suivant leur

dimension, notamment en diamètre, les racines ont une résistance différente et donc des effets distincts sur la stabilité des talus. Pour les racines fines (< 3 mm de diamètre), la force nécessaire à la rupture est supérieure à la force critique de déracinement, tandis que pour les racines de diamètre supérieur, la force critique de rupture est moins importante que la force critique de déracinement. Ceci met en avant l'existence d'un diamètre seuil, variant en fonction des espèces considérées, au dessus duquel toutes les racines cassent, et en dessous duquel, certaines racines cassent et d'autres sont déracinées, pour une certaine force appliquée (Norris and Greenwood 2003; Pollen 2007).

La résistance à la traction des racines est inversement proportionnelle à leur diamètre, et la résistance au déracinement des arbres augmente avec la longueur des racines et la profondeur de pénétration (Nilaweera and Nutalaya 1999; Watson et al. 1999). Les racines fines, par leur élasticité, augmentent la cohésion des matériaux à grande échelle, tandis que les racines de structure assurent une stabilisation des matériaux à l'échelle du système racinaire.

Les hétérogénéités du point de vue des propriétés physiques du substrat, de la disponibilité en eau et nutriments, et les irrégularités de la surface topographique sont autant de paramètres qui influent sur la géométrie et la topologie du système racinaire. L'architecture racinaire a également une influence sur la stabilité des pentes (Reubens et al. 2007). Cet auteur distingue les paramètres architecturaux en fonction de leur action mécanique ou hydrologique sur la stabilité des terrains en pente (Tableau I.4). La distribution spatiale du RAR (Root Area Ratio) (cf. I.2.1.2.) est souvent utilisée pour analyser la stabilité des pentes, tandis que la densité racinaire (RD) ou (RLD) est utilisée pour analyser l'érosion hydraulique.

Contrôle mécanique agit sur le renforcement du sol (glissement)	Root Area Ratio, Cross Sectional Area, Root Density, Root Length Density, longueur du pivot, profondeur maximum atteinte, distribution de la biomasse racinaire
Contrôle hydrologique agit sur l'érosion interne et externe (infiltration et ruissellement)	Root Density, Root Length Density, volume racinaire total, longueur racinaire totale, nombre total de racines

Tableau I.4 : Effets mécanique et hydrologique des paramètres architecturaux sur la stabilité des pentes (Reubens et al., 2007).

D'après Reubens et al., 2007, la stabilité des pentes est accrue par la présence d'un réseau dense de racines fines et flexibles à proximité de la surface et par des racines verticales profondes larges et rigides.

La seule prise en compte des contraintes perpendiculaires (mesure de la résistance des racines à l'étirement et de leur seuil de rupture) simplifie extrêmement les processus et considère les racines et le sol séparément. Or, la résistance des racines est à mettre en relation avec les propriétés du substrat qui sont le facteur principal contrôlant la stabilité des terrains.

2.3.3. Relations entre structure racinaire, propriétés du sol et stabilité des pentes

Les hétérogénéités spatiales sont fonction du substrat et de la distribution des racines, et les hétérogénéités temporelles dépendent essentiellement des saisons (variations des conditions météorologiques, des modifications de teneur en eau et des caractéristiques et fonctions de la végétation) (Reubens et al. 2007).

Fourcaud et al, (2004) ont réalisé une étude sur les interactions entre les propriétés du sol et la structure racinaire. Il a été démontré que les différents styles de structure racinaire induisent d'importantes différences du point de vue de la stabilité et de la résistance des arbres à l'arrachement, au même titre que les différences de substrat (texture) (Figure I.4). Pour un système racinaire donné, la résistance à l'arrachement est plus importante sur sols argileux que sur sols sableux. Tandis que, sur sols argileux, les systèmes racinaires fasciculés sont plus stables et assurent un meilleur ancrage, sur sols sableux, ce sont les systèmes racinaires pivotants qui ont une meilleure résistance au déracinement et assurent une plus grande stabilité (Figure I.4).

L'importance du renforcement racinaire dépend du type de substrat, de sa saturation en eau, de l'espèce végétale considérée, de la structure ainsi que de la distribution racinaire (Figure I.4). La comparaison de la stabilité des berges avec et sans la présence de végétation arborée, et donc de racines, révèle que les racines améliorent nettement la stabilité, modifient la contrainte de cisaillement et diminuent les probabilités de glissement du sol (Abernethy and Rutherford 2000b; Pollen 2007). La quantification du renforcement racinaire, c'est-à-dire de l'augmentation de la cohésion du sol due aux racines, introduit la prise en compte des caractéristiques du sol (humidité, pression interstitielle, rugosité). Le calcul du renforcement racinaire prend en compte la résistance à la traction des racines (Tr en MPa), la surface racinaire vue en coupe (Ar en cm^2), la surface de la coupe étudiée (Aw en cm^2), l'orientation des racines (θ) et l'angle de friction interne (ϕ) (Abernethy and Rutherford 2001; Simon and Pollen 2004). Le renforcement racinaire est intégré au calcul du Facteur de Sécurité (FS) qui prend en compte la cohésion du sol, la contrainte normale et le coefficient de friction. De façon générale, FS diminue pendant les périodes humides (probabilité de glissement du sol plus élevée) et, pour une berge ou un talus côté cours d'eau de digue, il augmente fortement pendant le pic de crue (rôle de la pression de l'eau exercée sur les parois du chenal) et chute brutalement à la décrue ou à la vidange (rôle du poids des berges saturées en eau).

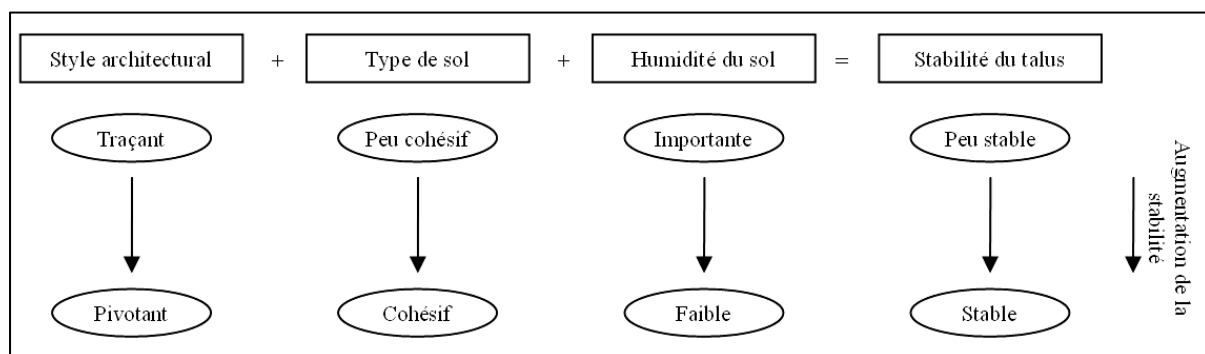


Figure I.4 : Synthèse des paramètres influençant la stabilité des terrains (Fourcaud et al., 2004 et Reubens et al., 2007)

Les études basées sur l'estimation du renforcement racinaire en fonction de la résistance des racines à la traction (capacité et limite d'extension) mettent en avant le rôle toujours positif des racines sur la stabilisation des pentes. Très peu d'auteurs dénoncent les impacts négatifs des systèmes racinaires sur leur support tels que le déracinement (chablis) (Clément 1993; Šamonil et al. 2010), la fragmentation de la roche par les racines (Osterkamp et al. 2006) ou le décompactage lié au développement racinaire.

3. Techniques d'acquisition et de traitement des données sur les systèmes racinaires

La complexité de l'étude des systèmes racinaires est liée à la nécessité de prendre en compte de multiples paramètres. Il faut tout d'abord noter les difficultés d'observation et de recueil des informations concernant cette partie souterraine des végétaux.

Les différentes méthodes utilisées dans la littérature pour la mesure et l'analyse des systèmes racinaires ont été comparées. Du point de vue méthodologique, l'acquisition des données architecturales est similaire, qu'il s'agisse de la partie aérienne ou racinaire d'un arbre. Les informations concernant les appareils de mesure et logiciels de traitement associés, le temps de collecte et de traitement des données, les caractéristiques techniques et enfin, les avantages / inconvénients de ces techniques sont exposées ici.

3.1. Le numériseur magnétique

3.1.1. Principe

Il s'agit d'une technique basée sur la numérisation semi-automatique de la partie aérienne de l'arbre ou du système racinaire après excavation. Le numériseur le plus fréquemment utilisé est le 3SPACE Fastrak, Long Ranger option, Polhemus [www.polhemus.com] (Danjon et al. 1999b; Fourcaud et al. 2004; Reubens et al. 2007; Sinoquet and Rivet 1997; Sinoquet et al. 1997). 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) (Figure I.5). 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 1mm. Les objets métalliques situés dans le volume de mesure interfèrent avec le champ magnétique et perturbent l'acquisition des données.

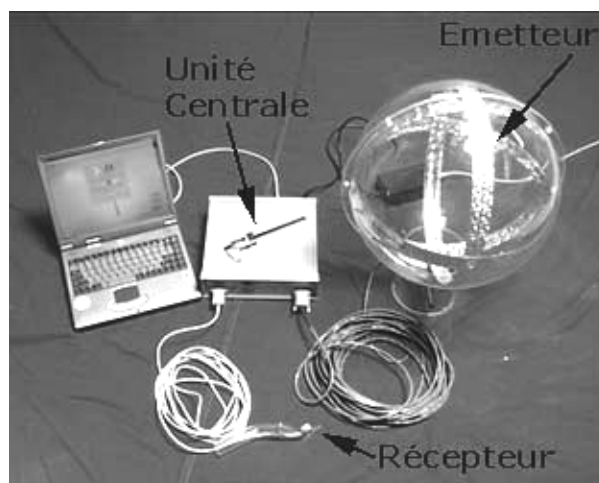


Figure I.5 : Présentation du dispositif du numériseur
<http://www2.clermont.inra.fr/piaf/fr/methodologies>

3.1.2. Acquisition des données

Plusieurs logiciels permettent d'acquérir et d'enregistrer les données issues de la digitalisation :

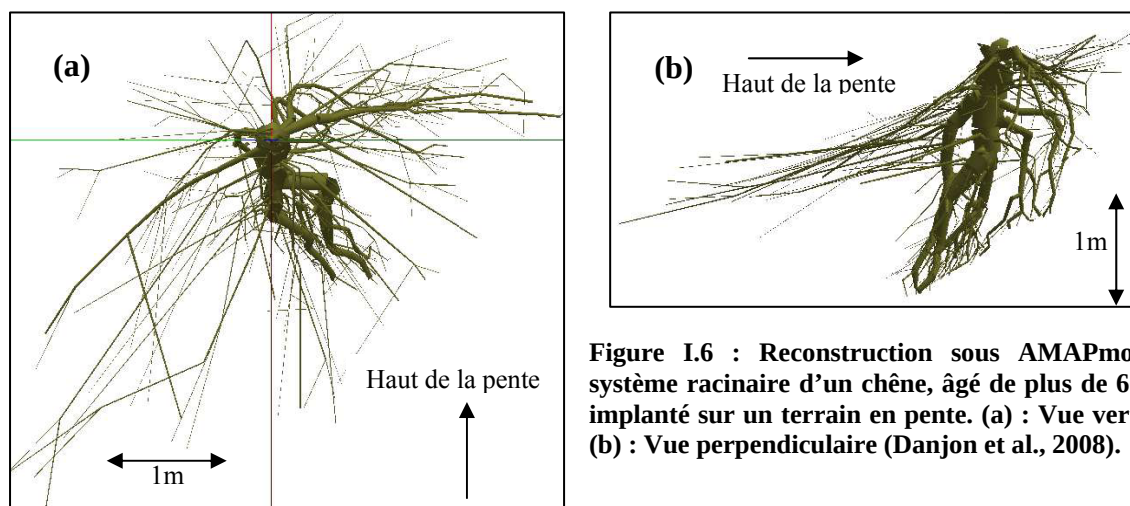
- **POL95** permet de piloter et de configurer le numériseur électromagnétique, d'acquérir les points de digitalisation, et de saisir de l'information sur les points mesurés dans un format de style tableur [INRA, UMR PIAF, téléchargeable sur <http://www2.clermont.inra.fr/piaf/>].
- **3A** « Acquisition de l'Architecture de l'Arbre » pilote l'acquisition de la topologie selon le codage standard AMAPmod (cf. point suivant – 2.1.3. Traitement et analyse des données). Il permet d'effectuer l'acquisition de la topologie, de positionner les constituants de la plante dans l'espace en pilotant le numériseur magnétique 3D, et de visualiser en temps réel la plante en cours de mesure [INRA, UMR PIAF, téléchargeable].

- **DiplAmi**, assimilable au logiciel 3A, permet d'acquérir simultanément les coordonnées spatiales, la morphologie des éléments mesurés (géométrie) et la forme des embranchements (topologie) [Développé et délivré par P.Rivet, INRA] (Danjon et al. 1999b; Sinoquet et al. 1997).
- **PiafDigit** permet de faire l'acquisition des données architecturales (topologie et/ou géométrie) en pilotant le numériseur électromagnétique tridimensionnel. Ce logiciel intègre les fonctionnalités de POL95 et 3A, tout en étant plus facile à configurer et utiliser et plus rapide au niveau de l'acquisition de la topologie [INRA, UMR PIAF, téléchargeable].
- **POV-Ray** « Persistence of Vision Raytracer » est un logiciel de retraçage consacré aux images de synthèse - partie aérienne de l'arbre (Sinoquet and Rivet 1997; Sinoquet et al. 1997).

3.1.3. Traitement et analyse des données

AMAPmod (devenu VPlAnt depuis 2009), logiciel développé pour l'analyse architecturale, permet d'exécuter une exploration architecturale détaillée, de mesurer, analyser et modéliser la structure des plantes (Barthélémy et al. 1995; Godin et al. 1997a; Godin et al. 1997b; Sinoquet et al. 1997). AMAPmod fournit les outils nécessaires (statistiques et graphiques) à l'encodage, à l'analyse et à la modélisation des systèmes racinaires, à différentes échelles d'observation. Ce logiciel est utilisé pour évaluer plusieurs caractéristiques de l'architecture racinaire, incluant la distribution spatiale, la longueur et le volume des racines, l'ordre et les formes d'embranchement et enfin, pour reconstruire une image 3D à partir des données (Figure I.6). La vérification des résultats est effectuée par comparaison des photos et images numériques reconstituées. AMAPmod permet, par exemple, 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. 2008; Danjon et al. 1999b; Reubens et al. 2007).

Les objectifs et les contraintes liés à l'observation de la structure des arbres requièrent l'élaboration d'un protocole de mesure. En effet, la multitude de données qu'il est possible d'extraire des structures aériennes ou racinaires des plantes nécessite un codage des informations topologiques et géométriques. Godin et al., (1997) et Sinoquet et al. (1997), ont mesuré et encodé l'architecture de la partie aérienne d'essences arborées. Ce codage est lu par le logiciel AMAPmod (langage de programmation spécifique AML - AMAP Modelling Language) qui crée une représentation graphique de la plante mesurée (MTG –Multiscale Tree Graph). L'analyse architecturale requiert une description multi-échelle de l'organisation du végétal (Figure I.7). Il est ensuite possible d'explorer les données MTG (fichiers texte) grâce au langage AML (extraction d'informations par requêtes) pour déduire les lois de comportement des systèmes ramifiés.



Dans l'application à l'étude des parties aériennes, la plante (P) est décrite en termes d'axes (A), d'unités de croissance (U) ou segments (S) et d'internœuds (I) (Danjon et al. 1999b; Godin et al. 1997a; Godin et al. 1997b; Sinoquet et al. 1997). L'axe 1 (ou ordre1) est le tronc, les axes 2 sont les branches partant du tronc, etc. (Figure I.7 et Tableau I.5). Les relations topologiques sont décrites par des symboles, dont le codage est le suivant : « / » : inclusion, « < » : succession, « + » : embranchement (Danjon et al. 1999b; Godin et al. 1997a; Godin et al. 1997b; Sinoquet et al. 1997).

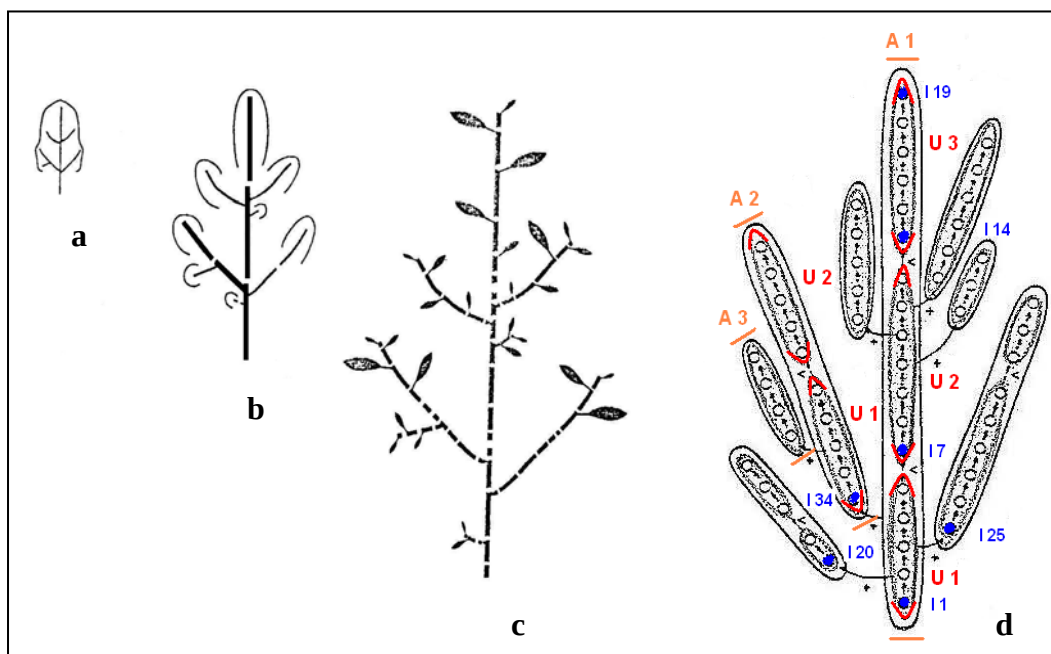


Figure I.7 : Les trois échelles d'observation et d'analyse de la structure de la partie aérienne d'un arbre et la représentation MTG associée, Godin et al., 1997b, modifiée. (a) : représentation morphologique globale avec les axes principaux (style d'architecture), (b) : échelle des unités de croissance ou segments, (c) : échelle des internœuds, (d) : représentation graphique multi-échelle.

Le Tableau I.5 présente un extrait des informations acquises sur l'architecture d'un système racinaire. Les coordonnées spatiales (x, y, z), et les angles d'Euler (ψ (psi) : azimut), θ (teta) : élévation), ϕ (phi) : rotation) sont enregistrés par le numériseur Fastrak, tandis que l'ordre et le codage topologique, la distance entre deux points mesurés, le diamètre et le nombre des racines sont entrés dans le programme manuellement par l'opérateur.

Order	Code	Distance	X	Y	Z	psi	teta	phi	Diameter	Number
	/P15									
1	/A1	62.3	147.86	-3.44	-26.16	-10.61	-37.86	-94.61	73	0
1	/S1	6.6	149.28	-1.63	-32.39	-68.38	-55.87	-49.32	67	
1	<S2	0	149.28	-1.63	-32.39	349.39	-37.86	-94.61	67	
2	+A1	4.7	145.34	-0.76	-29.95	38.79	-53.68	89.08	20	1
2	/S1	2.5	145.77	-2.44	-31.74	38.75	2.93	44.73	17	
2	<S2	5	148.24	-5.87	-34.37	4.81	22.66	14.49	13.5	
3	+A1	1.6	148.64	-6.75	-35.69	48.11	-23.99	91.13	9	
3	/S1	1.8	148.77	-7.1	-37.44	46.87	-7.26	83.42	7	
3	<S2	2.7	148.36	-8.71	-39.63	41.85	-9.18	72.78	6	
2	<S3	4.6	150.68	-8.23	-35.79	28.69	-0.05	7.79	12	
2	<S4	11.7	156.4	-18.49	-35.88	49.59	13.26	18.64	8	

Tableau I.5 : Table de données affichée sous le programme Diplami, (Danjon et al., 1999).

L'analyse architecturale de différentes espèces, réalisée par Atger et Edelin (1994 a, b), a révélé une grande analogie structurale et ontogénique* des appareils racinaires et caulinaires*.

- Il y a, du point de vue statique, une analogie structurale et fonctionnelle :

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

- Et du point de vue dynamique, une analogie ontogénique :

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* qui est un moyen d'accroître considérablement la surface globale occupée par le système racinaire.

Cette étude de Atger et Edelin, (1994a, b), permet d'avancer que le codage topologique appliqué aux appareils caulinaires des arbres peut être transposé presque complètement aux systèmes racinaires. Seules les unités de croissance (U), plus difficilement perceptibles sur les racines, peuvent être remplacées « par des segments » (S) (Danjon et al. 1999b; Sinoquet and Rivet 1997).

D'autres logiciels d'analyses statistiques peuvent être utilisés, en remplacement ou complément d'AMAPmod, pour l'étude des données architecturales :

- **ABAQUS** est un programme disposant d'outils de calcul adaptés à la description de la structure 3D (module d'élasticité, module de rupture...) (Fourcaud et al. 2004).

- **GROGRA** (Growth Grammar Interpreter) peut être utilisé pour l'analyse des données architecturales et pour construire les représentations graphiques en 3 dimensions (Oppelt et al. 2000).

3.1.4. Utilisation et références

- Sinoquet et al., (1997a, b), ont couplé l'utilisation du numériseur Fastrak avec les logiciels DiplAmi et POV-Ray afin de reconstituer l'architecture 3D de la partie aérienne de deux noyers de 20 ans.

- Fourcaud et al., (2004), ont utilisé le numériseur Fastrak et les logiciels DiplAmi et ABAQUS afin d'étudier l'architecture aérienne et souterraine de 3 pins maritimes.

- Danjon et al., 1999 et 2008, ont réalisé une étude sur les systèmes racinaires de *Quercus petraea* (28 ans) et *Pinus pinaster* (5 ans) au moyen du numériseur Fastrak et du logiciel AMAPmod. Deux à trois heures par système racinaire ont été nécessaires pour l'acquisition des données (10 à 14 s par point – coordonnées et angles), et sept heures pour le traitement des données sans reconstruction du modèle topologique numérique. Les mesures ont été effectuées tous les 2 à 20 cm sur les axes principaux et tous les 50 cm le long des racines secondaires. Des mesures systématiques du diamètre (à 0.1 mm près avec pied à coulisse en plastique) ont été effectuées. Seules les racines > à 2 mm de diamètre ont été mesurées (Danjon et al., 1999), ou > à 10 mm (Danjon et al., 2008).

La digitalisation 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 avec des mesures supplémentaires (dimension, nature, position) caractérisant les points digitalisés, ainsi que d'analyser les résultats grâce aux logiciels développés à cet effet.

3.2. Le numériseur laser

3.2.1. Principe

La numérisation 3D à balayage est basée sur l'émission-réception de faisceaux laser (onde lumineuse). Le laser est un amplificateur de rayonnement électromagnétique (acronyme anglais de « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation »). 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. La proportion du signal lumineux réfléchi dépend des propriétés du matériel observé et des caractéristiques techniques du laser (longueur d'onde) (Clark and Robson 2004).

Cette technologie permet une connaissance fine de l'objet observé et la création d'un modèle numérique tridimensionnel à partir d'images individuelles ayant des zones et marques communes permettant leurs fusions (Gärtner and Denier 2006; Gärtner et al. 2009).

3.2.2. Utilisation et références

Le système laser a été mis en œuvre afin de numériser le système racinaire d'un hêtre mature (Gärtner et al. 2009). Le laser terrestre à balayage Cyrax 2500 (également appelé Leica HDS2500) a été utilisé lors de cette étude afin de représenter la répartition en 3D du système racinaire. Le Cyrax 2500 dispose d'une précision de ± 4 mm, la distance verticale et horizontale entre chaque point de mesure est de 0,25 mm. La précision de la surface modélisée est de ± 2 mm (Clark and Robson 2004; Gärtner and Denier 2006).

Les informations concernant les racines scannées sont contenues dans un fichier de données (1000 points par lignes et par colonnes, correspondant aux coordonnées spatiales) représentant la surface racinaire visible depuis la position du laser-scanner. Quatre scans doivent donc être réalisés pour minimiser la perte d'information liée à l'effet « zone d'ombre ». Des repères (quatre au minimum) doivent être placés autour de la souche pour permettre l'assemblage des quatre images et la reconstitution numérique 3D (Figure I.8). Le temps requis pour chaque scan est de 15 minutes (1h30 en tout ; repositionnement du scanner compris) (Gärtner and Denier 2006). Les racines de diamètre supérieur à 4-5 mm sont bien représentées, tandis que celles inférieures à 2 mm sont perceptibles mais difficilement différenciables (Figure I.8). Le modèle de représentation 3D est généré par le logiciel CAD/CAE Bentley, permettant d'estimer la biomasse racinaire.

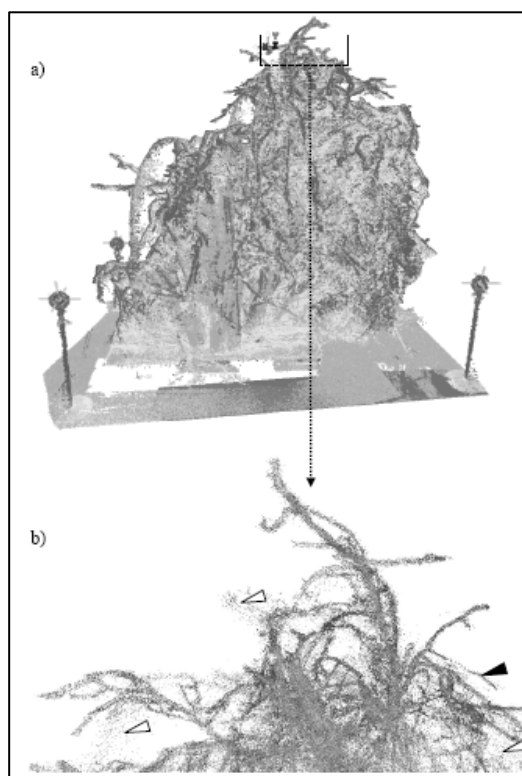
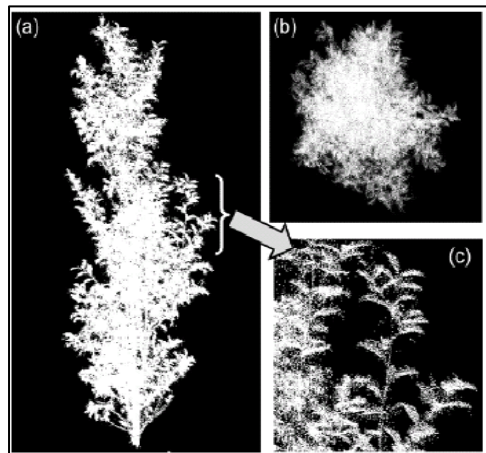


Figure I.8: (a) Reconstruction 3D du système racinaire à partir de quatre scans réalisés par le laser et des balises repère. (b) Zoom ; flèches noires = racines de 4-5mm de diamètre et flèches blanches = nuages représentant les racines inférieures à 2mm dont la perception imprécise ne permet pas une représentation continue (Gartner et Denier, 2006).

Fournier et Côte (2006) se sont intéressés au système Lidar (Light Detection And Ranging) dans le cadre d'une étude sur la modélisation architecturale des couverts forestiers. Cette technique permet l'acquisition de mesures sur la structure des couvertures végétales à différentes échelles. L'utilisation conjointe de lasers aéroporté et terrestre permet une nette



augmentation de la précision des relevés. Les auteurs ont étudié les différentes méthodes permettant de lier les données de systèmes Lidar aéroporté (résolution spatiale de l'ordre du décimètre) et terrestre (résolution spatiale de l'ordre du millimètre) à la structure de couverts forestiers par la modélisation architecturale. Ilris-3D Optech, est le laser terrestre utilisé pour les mesures in situ afin d'estimer les données dendrométriques* d'arbres individuels en forêt.

Le principal modèle d'architecture employé est le VoxTrek « Voxel (Volumetric Pixel) Tree with 3D Kites », qui permet de reconstruire la structure du végétal à niveau de détails de la branche (Figure I.9).

Figure I.9 : Reconstruction d'un arbre par voxélisation, à partir des données obtenues par balayages laser, (a) : vue perpendiculaire, (b) : vue verticale, (c) : zoom. (Fournier et Côte, 2006).

Le laser terrestre est une technique permettant l'acquisition de données, à haute résolution, sur la structure des végétaux et qui semble ainsi appropriée à l'étude de l'architecture racinaire d'essences arborées.

3.3. La photogrammétrie

3.3.1. Principe

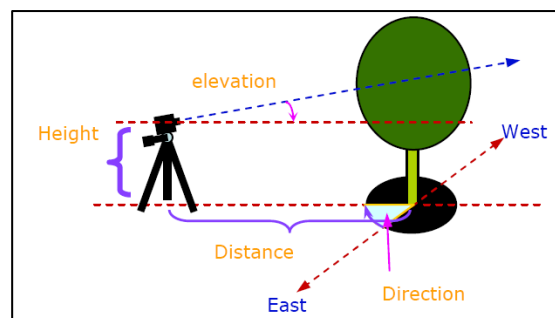
La photogrammétrie est une technique de mesure pour laquelle les coordonnées en trois dimensions des points d'un objet sont déterminées par des mesures faites sur une ou plusieurs images photographiques prises à partir de positions différentes. Ce géoréférencement relatif permet de définir avec précision 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 and Arias 2005). Afin de reconstruire le modèle 3D, il est nécessaire d'orienter les photographies : l'orientation interne correspond au calibrage de l'appareil photographique et se caractérise par une transformation du système de coordonnées afin de passer des coordonnées-pixel aux coordonnées-photo (utilisation des marques repères), l'orientation externe a pour but de transformer les coordonnées-modèle en coordonnées-terrain en leur faisant subir une translation, un changement d'échelle et une rotation spatiale (Barker et al. 1997). Les programmes de géo-correction, tel que Imagine, Erdas 2001, assurent une rectification simple et correcte des photographies (Dean 2003). Les logiciels photogrammétriques permettent d'acquérir des données quantitatives précises sur les éléments observés. Cependant, dans le cas des photographies de systèmes racinaires, la perte d'informations visuelles par masquage est potentiellement importante et nuit à la qualité de la reconstitution 3D.

3.3.2. Utilisation et références

- **Tree Analyser** est un logiciel développé par l'INRA, UMR Piaf, 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 (Figure 6). (Phattaralerphong and Sinoquet 2000) [INRA, UMR PIAF, téléchargeable sur : <http://www2.clermont.inra.fr/piaf/telechargement/methodologie/>].

Figure I.10 : Paramétrage des prises de vue.
(Phattaralerphong et Sinoquet, 2005)



- **RMS** « Root Measurement System » est un logiciel, développé par le département « Crop and Soil Sciences » de l'Université de Georgia, permettant l'extraction d'informations quantitatives en 2 dimensions à partir d'images digitales comportant des points de repères spatiaux (échelle). Il permet d'évaluer le nombre de racines, de mesurer les longueurs et les diamètres, ainsi que de calculer l'aire et le volume des racines. Ce type d'étude a été réalisé afin de quantifier les dimensions de racines d'herbacées (*Festuca arundinacea*) à partir de photographies de mini-rhizotrons (Ingram and Leers 2001).

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

Dans le cas de nos travaux, portant sur un nombre d'arbres élevé, l'utilisation des techniques d'acquisition semi-automatique n'a pas été retenue, car trop longue à mettre en oeuvre. Nous avons effectué des mesures architecturales basiques sur les systèmes racinaires excavés en recueillant manuellement les informations topologiques et dimensionnelles (Reubens et al. 2007) fréquemment utilisées pour les modèles fractals (Soethe et al. 2007). Le traitement des données sous AMAPmod, prévu en collaboration avec F.Danjon (INRA) n'a pas pu être réalisé pour des raisons de non-compatibilité du format des données.

Nous avons mis en œuvre à titre expérimental (sur deux de nos chantiers) le numériseur laser car cette technique permet une acquisition automatique très rapide et complète des données racinaires en 3D.

4. Méthodes d'étude de la croissance racinaire

Dans le cadre des études portant sur l'impact de la végétation ligneuse implantée sur les ouvrages hydrauliques, il est nécessaire d'identifier les méthodes permettant d'appréhender les vitesses de développement des systèmes racinaires et les modalités de croissance des racines.

4.1. Suivi du développement des systèmes racinaires

L'étude du développement des systèmes racinaires, c'est-à-dire l'analyse morphologique des racines principales et l'observation de leur ordre d'apparition, permet d'établir un modèle architectural qui traduit la stratégie de développement de l'appareil racinaire (Atger 1991; Atger and Edelin 1994a; 1994b; 1995).

L'analyse architecturale est utilisée pour comprendre et modéliser le développement des plantes. Cette méthode a pour objectif l'étude de la forme des arbres et des mécanismes responsables de leur édification tout au long de l'ontogenèse. Elle prend en compte les propriétés structurales et fonctionnelles des racines : caractéristiques anatomiques (longueur,

diamètre, forme), modalités de croissance et de ramification, nature des organes latéraux auxquels elles donnent naissance, localisation sur l'axe porteur, ordre d'apparition et position dans le système au cours de son développement (Atger 1991).

L'étude porte sur une série d'arbres de même espèce, d'âge croissant (Figure I.1). Chaque individu fait l'objet d'une excavation complète suivie d'une étude morphologique détaillée de ses différentes racines. Celles-ci sont référencées suivant leur localisation dans le système ramifié (Axe 1 : pivot, A2 : racines latérales partant du pivot, A3...). La longueur, l'orientation, la forme (cylindrique ou conique), le diamètre et la couleur de l'écorce renseignent sur la fonction et la durée de vie de la racine, tandis que la symétrie, la position, et l'angle d'insertion de ses formations latérales traduisent les modalités de ramification (Atger and Edelin 1994a; 1994b). Ces auteurs ont effectué une classification des organes racinaires en fonction de leur position dans la topologie du système et de leur nature et fonction. Les deux principales catégories d'organes racinaires déterminées sur *Platanus hybrida* sont les suivantes : des axes 1 à 4, il s'agit de racines ligneuses qui constituent l'infrastructure pérenne ayant comme rôle principal l'ancrage de l'arbre ; des axes 5 à 7, il s'agit du chevelu racinaire non ligneux caduque, ayant pour principale fonction l'absorption d'eau et d'éléments nutritifs (Atger and Edelin 1994a).

La succession de formes observées sur les différentes racines de chacun des individus d'âge différent permet de déduire l'ordre d'apparition et le fonctionnement de chacun de leurs axes, de caractériser la nature et la suite des événements morphogénétiques responsables du développement du système racinaire (Atger and Edelin 1995; Jourdan and Rey 1997).

L'orientation de la croissance racinaire, la distribution radiale des racines autour du collet et la répartition de la biomasse racinaire permet d'appréhender le développement de la structure des systèmes racinaires (Drexhage et al. 1999; Drexhage and Gruber 1998). Dans le cadre de cette étude, 55 chênes sessiles, âgés de 20 et 28 ans, ont été analysés. La décroissance des diamètres avec la distance radiale par rapport à la souche et avec la profondeur ainsi que la variation de l'inclinaison des racines ont permis de décrire les différences de structure racinaire associées à la différence d'âge des peuplements. D'après la méthode employée (calcul du CSA, Tableau I.2), l'espace racinaire est subdivisé en trois cylindres de diamètres et de profondeurs croissants, la mesure du diamètre des racines et de leur direction azimutale étant effectuée à chaque point où les racines interceptent la surface extérieure d'un cylindre. Les relations statistiques entre le diamètre du tronc (à 1,30m), la surface totale des sections de racines et la biomasse racinaire ont été établies. Les auteurs ont mis en avant que dans le cas de sols aux propriétés non restrictives (substrats dont les caractéristiques - humidité, granulométrie, compacité - ne contraignent pas le développement racinaire), l'architecture des systèmes racinaires est le résultat d'un processus de croissance propre à l'espèce. Dans ces conditions, la distribution des racines est relativement homogène (pas de direction privilégiée) et les diamètres racinaires au collet sont suffisants pour prédire la répartition de la biomasse, étant donné que 75 % des racines conservent leur orientation de croissance.

4.2. Modélisation de la croissance racinaire

La modélisation dynamique, permettant de construire le modèle de l'évolution d'un système, a été utilisée afin de caractériser la croissance racinaire d'arbres de différentes espèces. Les modèles d'architecture végétale sont spécialement mis au point pour la description et la compréhension des mécanismes influençant la structure et la morphologie des plantes (Barthélémy et al. 1995; Blaise and Reffye 1994; Fourcaud et al. 2004). L'Unité de Modélisation des plantes du CIRAD a développé une méthodologie de mesure et d'analyse de la croissance permettant la description précise des lois qualitatives et quantitatives de leur fonctionnement. Le logiciel AMAPpara simule le développement des arbres et génère des

maquettes informatiques tridimensionnelles conformes à la réalité botanique, prenant en compte les interactions entre le végétal et son milieu (stress climatique, compétition) pouvant influencer son architecture. Cette méthode a été appliquée essentiellement à la partie aérienne des arbres.

La simulation de la croissance des racines en 3D nécessite une description précise de la structure du système racinaire (morphologie, topologie et géométrie des racines principales et secondaires) (Mulia 2005; Mulia and Dupraz 2006). Dans le cadre de sa thèse, Mulia (2005) propose un modèle dynamique de croissance des systèmes racinaires en milieu hétérogène basé sur le concept de l'automate voxellaire. Ce modèle permet de prédire la croissance des racines fines et des racines charpentières en prenant en compte les effets de la variation des conditions locales. Cet automate peut prévoir la plasticité et l'adaptabilité d'un système racinaire en croissance en 3D dans un sol hétérogène. Les données obtenues au cours des expérimentations en conditions contrôlées ont permis de paramétrer le modèle. Celui-ci prend en compte la pénétrabilité des matériaux, leur teneur en eau et en azote ainsi que le taux de plagiotropisme* et de prolifération racinaire dépendant de chaque espèce. Au sein de chaque voxel, mesurant 10 x 10 x 12,5 cm, à la teneur en eau et en azote contrôlée, les racines fines (< à 2 mm de diamètre) et les racines de structure (> à 2 mm de diamètre) ont été récoltées. Les systèmes racinaires de certaines espèces (telle que le noyer) réagissent très rapidement aux expériences d'enrichissement localisées (en azote, phosphore, potassium et eau), par un foisonnement de racines dans ou à proximité des voxels enrichis. Il en résulte une déformation des distributions de racines en comparaison avec les distributions observées sur des substrats homogènes. Ce type de résultat révèle l'opportunisme des systèmes racinaires et quantifie leurs réponses à des conditions hétérogènes imposées.

L'automate racinaire prend en compte les processus physiques impliqués dans la croissance des systèmes racinaires. Il peut être utilisé pour tester différentes hypothèses sur la croissance racinaire et pour prédire la forme de l'enracinement des arbres dans des conditions de sol variées, à condition de savoir caractériser l'hétérogénéité du sol en trois dimensions.

4.3. Lecture des cernes de croissance annuels

Le développement de l'appareil racinaire peut également être appréhendé en analysant l'âge des racines, par lecture des cernes de croissances annuels. La dendrologie, ou science des arbres, est appliquée à différents thèmes de recherche ; dendroécologie, dendroclimatologie, dendroarchéologie, dendrogéomorphologie. Ces études concernent généralement la partie aérienne des arbres. Les cernes du bois racinaire sont, en effet, plus difficilement lisibles que les cernes de bois aérien. L'analyse des cernes de croissance des racines est souvent associée à l'évaluation des taux d'érosion en géomorphologie, une modification anatomique du bois racinaire se produirait au moment de la mise « hors sol » des racines (Bodoque et al. 2005; Gärtner 2006; Gärtner 2007; Hitz et al. 2008; Malik 2008; Rubiales et al. 2008). Quelques études portent sur l'excentricité des cernes de croissance racinaire en relation avec l'ancrage des arbres (Mattheck and Breloer 1992; Weber and Mattheck 2005). Une très forte excentricité caractérise les racines de structure à la base du collet, notamment chez les vieux arbres. Peu d'études portent sur la relation entre croissance racinaire radiale et conditions environnementales (Krause and Eckstein 1994; Krause and Morin 1999).

Gartner et al. (2009) ont intégré les cernes annuels de croissance des racines au modèle numérique 3D (réalisé à partir de données laser - Figure I.8) afin de pouvoir réaliser une analyse spatio-temporelle du développement d'un système racinaire mature. Cependant, la littérature scientifique ne contient pas d'informations sur les vitesses de croissance des racines en fonction des espèces végétales et des conditions environnementales.

L'analyse dendrologique nécessite de travailler sur du bois en bon état de conservation car l'altération de ce dernier rend impossible l'identification des cernes.

Dans le cadre de cette thèse, la modélisation de la croissance racinaire n'était pas envisageable. Nous avons travaillé essentiellement sur des arbres matures. Nous avons donc privilégié l'analyse dendrologique pour caractériser la croissance des racines.

5. Méthodes d'étude de la décomposition des racines

Pour la sécurité des ouvrages hydrauliques en remblai, il est nécessaire d'appréhender les effets et la vitesse de la décomposition des systèmes racinaires, suite aux recépages*, à l'abattage ou à la mort naturelle des arbres (sécheresse, parasites, vieillesse), dans la mesure où il est possible que les souches et racines pourries induisent une déstructuration des matériaux ainsi qu'un éventuel risque de renard hydraulique, lié à la création de conduits. La vitesse de décomposition renseigne quant à elle sur le délai maximal dont le gestionnaire dispose, après la mort des arbres, pour effectuer les travaux génie civil de confortement éventuellement nécessaires.

Les études portent essentiellement sur la dégradation du bois de la partie aérienne (tronc) afin d'évaluer les stocks de carbone en forêt (Sandstrom et al. 2007) ou la qualité des bois de construction (Longuetaud et al. 2001). Quelques auteurs s'intéressent à la décomposition des racines dans le but de caractériser les propriétés du sol, mais il s'agit généralement des racines fines - inférieure à 5 mm de diamètre (Frey et al. 2006; Ludovici and Kress 2006). Les études traitant de la décomposition de systèmes matures sont très rares (Ludovici et al. 2002). Cette dernière étude a estimé le taux de décomposition de systèmes racinaires in situ en utilisant une approche chronoséquentielle. Neuf peuplements de pin à encens (*Pinus taeda L.*) âgés de 55–70 ans coupés à blanc il y a 0, 5, 10, 20, 25, 35, 45, 55 et 60 ans ont été identifiés sur des sols bien drainés. La racine pivotante et les racines latérales ont été déterrées, mesurées et pesées. Bien que plus de 50 % de la masse totale de racines ait été décomposée au cours des 10 premières années suivant la récolte, les travaux d'excavation ont permis de récupérer des portions de grosse racine latérale (diamètre > 5 cm) et de racine pivotante qui persistaient après plus de 35 et 60 ans respectivement.

La caractérisation 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 restent des sujets de recherche encore quasi-inexistants au sein de la littérature scientifique.

5.1. Identification du bois décomposé

Les bois sains n'ont pas les mêmes caractéristiques mécaniques et chimiques que les bois dégradés. La transformation du bois sous l'effet de la décomposition passe par différents stades clairement identifiables. La première phase est celle de la discoloration, qui se traduit par une modification de la coloration naturelle du bois, mais qui n'est pas associée à une perte de résistance. L'échauffure est le premier stade de la pourriture et se caractérise par des veines ou des discolorations dans le bois, avec encore peu d'effet sur la texture générale et les propriétés mécaniques mais des transformations chimiques. Enfin, la pourriture se matérialise par la décomposition du bois sous l'action de champignons (développement fongique sous forme duveteuse ou poudreuse) ou d'autres 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). Les insectes contribuent aussi à la décomposition des bois enterrés et des racines en les consommant en surface ou en y creusant des galeries de diamètres et longueurs variés en fonction de leur taille et de l'espèce.

5.2. Paramètres influençant la décomposition du bois

Les paramètres influençant le degré de décomposition du bois sont la profondeur d'enfouissement, la température et l'humidité du sol, ainsi que le diamètre et la composition du bois (dépendant de l'espèce végétale) (Edmonds et al. 1986). Cette dernière étude, conduite sur des résidus de coupe, a révélé 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 gros diamètre, que la vitesse de décomposition du bois est plus élevée pour le bois enfoui à quelques centimètres de profondeur, que pour le bois à la surface du sol et pour le bois surélevé et enfin, 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 en fonction de son état de dégradation, de sa porosité, de sa résistance, et de sa densité.

5.3. Protocoles de mesure du degré de décomposition

5.3.1. Evaluation 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. Un test de résistance à la pénétration de la lame d'un couteau (lame de 8 cm de longueur) peut être effectué afin de donner une indication plus précise concernant le dernier paramètre énoncé. Ces critères de description permettent de distinguer les différentes classes de décomposition. Leur nombre varie d'un auteur à l'autre (Tobin et al. 2007).

5.3.2. Evaluation quantitative du degré de décomposition

▫ *Evaluation de la porosité du bois*

La numérisation des échantillons et la digitalisation des pores permet d'effectuer une analyse d'images assistée par ordinateur afin d'évaluer la surface des pores. La porosité en % de l'échantillon permet d'évaluer le degré de dégradation du bois (Costa and Pereira 2006).

▫ *Evaluation de la résistance du bois*

La résistance mécanique du bois peut être mesurée à l'aide de différentes techniques directes et indirectes.

- Le pénétromètre portatif, outil permettant traditionnellement de sonder la compacité des sols, est utilisé afin d'évaluer la dureté du bois et sa consistance par enfoncement d'une tige de longueur variable (4 à 5 cm en moyenne). Cette méthode permet d'obtenir une indication quantitative sur l'avancement de l'état de décomposition du bois (Lee and Sturges 2001; Tobin et al. 2007).
- L'abrasimètre mesure la résistance du bois à l'usure. Le test d'abrasion fait subir à l'échantillon un frottement continu à l'aide d'un disque rotatif (rotations, nombre de grains et de rotations/min à définir). L'échantillon soumis au test est pesé avant et après l'opération afin de mesurer sa perte de masse (<http://erichsen.fr>).
- Le test de solubilité à la soude mesure la résistance du bois à l'attaque chimique. Les hydrates de carbone contenus dans la cellulose du bois sont solubilisés par la solution d'hydroxyde de sodium 1%. La solubilité du bois dépend de son état de décomposition. Le

calcul de la solubilité (S) d'un échantillon est le suivant : $S (\%) = [(A-B)/A] \times 100$, avec A : poids de l'échantillon avant extraction et B : après extraction (<http://tappi.org>).

▫ *Evaluation de la densité du bois*

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).

- *Par déplacement d'eau*

La détermination directe de la densité s'effectue à l'aide de carottes ou de rondelles. Le calcul du poids volumique s'effectue en faisant le rapport entre le poids sec de l'échantillon et le volume brut (mesuré par déplacement d'eau) (Sandstrom et al. 2007; Tobin et al. 2007). Ces auteurs ont défini des classes de décomposition (cf. I.5.3.1.) sur critères visuels mais également quantitatifs, en caractérisant la densité des échantillons appartenant à chacune des classes. Les classes de degré de décomposition élevé se caractérisent par de faibles densités et par des quantités de biomasse de bois mort importantes.

- *Par rayons X*

Tandis que la radiographie rayons X, technique d'imagerie, permet de voir la composition interne d'un objet en image 2D, la tomographie rayons X permet de reconstruire le volume d'un objet à partir d'une série de mesures effectuées par tranche (2D) depuis l'extérieur de cet objet. On obtient donc une image 3D. Ces deux techniques sont non destructives (Osterloh et al. 2007). Les rayons X sont des rayonnements électromagnétiques de fréquences élevées. Contrairement à la lumière qui est absorbée ou réfléchiée par les objets solides, les rayons X traversent les corps opaques à la lumière, et en particulier les organismes vivants. Si un flux de rayons X d'intensité I_0 (nombre de photons par unité de temps et de surface) est envoyé à travers un objet, il va être atténué en fonction des caractéristiques de cet objet (composition atomique et densité). La tomographie rayons X est une technologie permettant d'obtenir une cartographie de la densité d'échantillons de bois (Freyburger et al. 2009; Longuetaud 2005).

▫ *Evaluation de la composition chimique du bois*

La résistance des matériaux dépend en grande partie de leur composition chimique. La lignine est un des principaux composants du bois, avec la cellulose, l'hémicellulose et les matières extractibles (Rowell 2005). La lignine contribue à la rigidité des parois cellulaires, assure une imperméabilité à l'eau et une grande résistance à la décomposition. La cellulose contribue à l'élasticité et à la souplesse des fibres du bois (Hagglund 1951).

- *Par extraction chimique*

En laboratoire, les échantillons de bois réduits en poudre sont préalablement débarrassés des extractibles (extraction des composants solubles à l'eau puis solubles à l'éthanol-toluène). Une filtration permet ensuite de séparer la lignine de la cellulose et des hémicelluloses (Frey et al. 2006; Giger 1985; Inari et al. 2007; Preston et al. 1997).

- *Par spectroscopie proche infrarouge*

Si les analyses chimiques classiques du bois sont longues et coûteuses, la spectrométrie proche infrarouge (SPIR) permet d'évaluer les caractéristiques chimiques d'un grand nombre d'échantillons en peu de temps. Cette technique analytique non destructive est basée sur le principe d'absorption de rayonnements électromagnétiques par la matière. La spectroscopie proche IR est une spectroscopie d'absorption dont le principe repose sur l'absorption du

rayonnement proche IR par la matière organique (Kelley et al. 2004). La méthode s'intéresse au nombre de liaisons chimiques spécifiques du constituant : O-H, N-H, C-H, etc. La SPIR permet d'obtenir simultanément, mais après un calibrage rigoureux, des informations aussi bien chimiques que physiques (Jones et al. 2006; Schimleck et al. 2001; Yeh et al. 2005), tels que les teneurs en lignine ou cellulose des différentes parties du bois (Malkavaara and Alén 1998; Raymond and Poke 2006).

Les différentes techniques d'évaluation du degré de décomposition permettent de quantifier l'état de dégradation du bois in situ ou plus précisément en laboratoire. Il faut cependant prendre en compte l'évolution temporelle de la décomposition du bois, et disposer d'échantillons de racines d'arbres dont les dates de mort sont connues et variées afin de pouvoir évaluer la vitesse de décomposition du bois et les transformations affectant le substrat.

Nous avons couplé, dans le cadre de cette thèse, les mesures par tomographie rayons X et déplacement d'eau pour déterminer la masse volumique du bois racinaire et la spectroscopie proche infra-rouge pour caractériser sa composition chimique.

Toutes les méthodes énoncées permettant l'analyse des systèmes racinaires nécessitent l'excavation des souches, entraînant l'abattage des arbres et la déstructuration des sols, ce qui est relativement gênant dans le cas des ouvrages en remblai. Les méthodes de détection non destructives des racines sont peu nombreuses et leurs performances sont souvent controversées.

6. Techniques de détection des systèmes racinaires

6.1. Rayons X et traceurs

Des techniques non invasives permettent l'obtention d'une image de système racinaire de plantes herbacées ou de céréales. La radiographie neutronique a été employée pour suivre les profils de déplétion en eau dans la rhizosphère. Le contraste dépend de la perméabilité du matériau aux neutrons thermiques (ou neutrons lents). La teneur en eau des racines étant supérieure à celle du sol, les racines apparaissent de manière contrastée sur les radiographies (Menon et al. 2007). La tomographie médicale (scanner) permet d'obtenir une bonne image d'un système racinaire en place (dans un pot), avec une résolution de l'ordre du mm et une vision 3D (Dorlodot et al. 2007; Hargreaves et al. 2009). Le contraste dépend de la densité du matériau.

L'évolution du système racinaire de certaines plantes dans le sol est suivi par injection de traceurs radioactifs (Albrecht et al. 2002). Cependant, il s'agit d'expérimentation en laboratoire, dans des colonnes de sols, avec des espèces particulières, choisies entre autres pour leurs facultés de développement rapide et de transfert des contaminants sol/plante. Ces techniques sont efficaces mais imposent une limite à la dimension des objets à analyser et ne sont donc pas applicables pour des systèmes racinaires ligneux matures de grandes dimensions, implantés en extérieur.

D'autres techniques sont utilisables sur le terrain pour l'étude de systèmes racinaires matures mais sont cependant moins performantes.

6.2. Le radar de sondage souterrain (GPR)

Le GPR « Ground Penetrating Radar » est une méthode qui permet la prospection du sous-sol de façon non destructive. Le radar est un système qui émet un rayonnement électromagnétique afin d'identifier et de caractériser un objet dans le sous sol. L'émetteur (ou antenne) envoie les ondes électromagnétiques qui sont réfléchies en fonction des différences de propriétés des matériaux puis détectées par un récepteur. Généralement, les systèmes radar se composent d'antennes interchangeables permettant la prospection du sol à des profondeurs et résolutions différentes, la précision du diagnostic diminuant avec la profondeur (Lorenzo and Arias 2005).

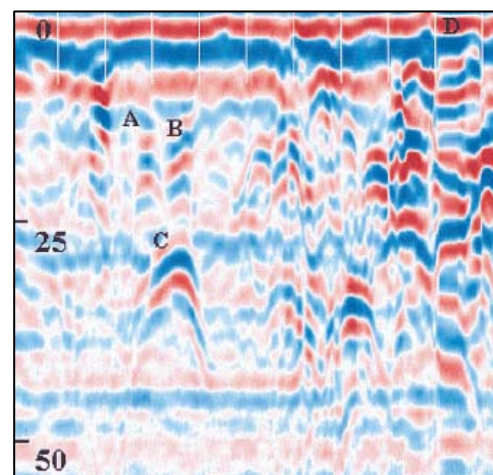
Les ondes réfléchies et enregistrées sont traitées (réduction du bruit par transformation colorimétrique et extraction du signal lié aux hétérogénéités) afin de pouvoir être exploitées. Le temps (nano seconde) enregistré est converti en profondeur (mètre). Les radargrammes donnent une image caractérisant la position des corps contenus dans le sol. Le radar percevrait les surfaces de contact entre les différentes couches de matériaux et les divers éléments ponctuels, tels que les câbles, conduites, blocs et les racines (Butnor et al. 2001; Stokes et al. 1999).

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 » équipés d'antennes de 400 et 1500 MHz. Le GPR est efficace dans les matériaux résistants (donc drainants). Les sols ayant une haute conductivité électrique (argiles) ou un taux d'humidité élevé dissipent rapidement le signal électromagnétique et réduisent la prospection en profondeur.

La détection des racines serait affectée par : (i) le gradient électromagnétique existant entre les racines et le sol, la taille, la forme et l'orientation des racines, (ii) la présence de corps dispersés dans le sol et (iii) la fréquence de l'antenne (les ondes basses fréquences pénètrent plus profondément dans le sol). La résolution varie avec la fréquence d'émission de l'antenne ; pour les basses fréquences, la résolution est de l'ordre du mètre tandis que pour les hautes fréquences elle est de l'ordre du millimètre (Cermak et al. 2000). Les perturbations du signal sur le radargramme donnent une indication sur la position et la taille des racines (Figure I.11).

Cermak et al., 2000, ont étudié le système racinaire de *Acer Campestre* en milieu urbain. L'instrument a été déplacé à la surface du sol tous les 25 cm et tous les 5 cm sur certains secteurs pour avoir une distribution très précise du système racinaire sur les profils. 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.

Figure I.11 : Radargramme obtenu avec le SIR 2000, 1,5 GHz. Profondeur en cm sur l'axe des ordonnées. Matériaux sableux drainants. L'origine des réflexions a été vérifiée après excavation : il s'agit de racines de *Populus Deltoides* (A) 0,6 cm de diamètre à 11 cm de profondeur, (B) 1,7 cm de diamètre à 14 cm de profondeur, (C) 3 racines regroupées de 1,5, 0,7 et 0,7 cm de diamètre à 27 cm de profondeur et (D) racine en surface (Butnor et al., 2001).



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; Nadezhdina

and Cermak 2003; Wielopolski et al. 2002; Zenone et al. 2008).

Le radar de sondage souterrain semblait pouvoir permettre la détection des racines dans les remblais. Dans le cadre de nos travaux, des tests de détection par cette technique ont été réalisés (cf. Annexe 1) mais n'ont pas permis l'obtention de résultats concluants. Le radar n'est pas adapté aux sols argilo-limoneux qui atténuent fortement le signal électromagnétique tandis que les matériaux graveleux génèrent de nombreux échos qui brouillent l'information (Wielopolski et al. 2002).

6.3. Les méthodes de détection électriques

Des études portant sur la polarisation provoquée (ou polarisation spectrale induite – SIP) ont démontré l'efficacité de la méthode pour l'identification de reliques de bois dans des tourbes de marais (Schleifer et al. 2002; Weller et al. 2006). Des investigations en laboratoire portant sur de multiples échantillons de bois ont montré d'importantes variations dans la force de polarisation selon l'orientation de l'échantillon, l'espèce végétale et la distance du tronc (Martin 2009a; 2009b; Weller et al. 2006). Martin (2009b) décrit l'application de la tomographie électrique et les effets de polarisation induite sur des arbres vivants. Les investigations en laboratoire sur des échantillons de bois infectés ont montré des variations de la résistivité électrique complexe liées à des maladies du bois.

La tomographie de résistivité électrique permet d'appréhender l'état interne des arbres sur pied en positionnant les électrodes en cercle autour du tronc (Al-Hagrey 2006; Nicolotti et al. 2003; Weihs et al. 1999). Les images illustrant la résistivité des sections transversales peuvent être utilisées pour estimer le flux de sève ou identifier les cavités et zones de pourriture à l'intérieur du tronc.

Les dispositifs de mesure de la résistivité électrique, utilisant plusieurs rangées d'électrodes implantées à la surface du sol ou dans de petits puits de forage, permettraient d'étudier le flux d'eau dans le sol et les plantes (Pagès et al. 2000) mais aussi de refléter la variabilité spatiale des racines dans le sol et d'évaluer quantitativement les biomasses (Amato et al. 2008; Amato et al. 2009; Petersen and Al-Hagrey 2009).

Cependant, aucune des méthodes non-destructives ne semble permettre une caractérisation précise de la taille et de la structure des systèmes racinaires d'arbres matures. Dans le cadre de cette thèse, nous avons eu néanmoins l'opportunité de tester deux de ces méthodes : le radar de sondage souterrain (cf. Annexe 1) et les mesures de résistivité électrique. Seule la deuxième a dégagé quelques minces perspectives et fait l'objet de la section III.5 ci-après.

7. Conclusion partielle

Cette synthèse bibliographique nous a permis de faire un bilan sur l'état des connaissances et sur les moyens d'investigations applicables aux systèmes racinaires. La plupart des études sur les appareils racinaires ont été réalisées en milieu agricole, forestier ou urbain. Les références bibliographiques portant sur l'étude des systèmes racinaires en milieu fluvial sont moins nombreuses, tandis que celles sur les milieux artificiels tels que les ouvrages hydrauliques en remblai et notamment les digues sont inexistantes, à l'exception des travaux préliminaires réalisés au sein du Cemagref d'Aix en Provence en 2003 et 2005 (Chandieux et al. 2005; Vennetier et al. 2004) et les rapports techniques américains (FEMA 2005), allemands (BAW 2005; DVWK 1993) et néerlandais (STOWA 2000; 2002; TAW 1994; 1999) qui recommandent bien souvent l'absence totale de végétation ligneuse sur les ouvrages.

MATERIELS

ET

METHODES

SOMMAIRE

Préambule.....	33
1. Les sites d'étude	34
1.1. Localisation des sites d'interventions.....	34
1.2. Présentation et caractéristiques des sites	34
1.2.1. Donzère et Montélimar	35
1.1.2. Lyon.....	38
1.1.3. Pertuis	41
1.2.4. Grenoble	43
1.2.5. Cosne-sur-Loire	46
1.2.6. Castérino.....	48
1.2.7. Monjoux	51
2. Excavation et description des systèmes racinaires	52
2.1. Protocole sur le terrain	52
2.1.1. Identification des arbres.....	52
2.1.2. Extraction des systèmes racinaires	53
2.1.3. Prélèvement et analyse des matériaux	53
2.2. Recueil et analyse des données.....	54
3. Description et mesures des racines	55
3.1. Protocole de mesure	55
3.2. Analyse des données	56
4. Etude dendrologique.....	56
4.1. Plan d'échantillonnage	56
4.2. Protocole	56
5. Décomposition	56
5.1. Plan d'échantillonnage	56
5.1.1. Dispositif expérimental sur la digue de l'Isère	57
5.1.2. Dispositif expérimental sur la digue de Castérino	57
5.2. Protocole	59
5.2.1. Sur le terrain	59
5.2.2. Au laboratoire.....	62
6. Détection électrique.....	69
6.1. Plan d'échantillonnage	70
6.2. Protocole	70
7. Conclusion partielle	70

PREAMBULE

Chacun des thèmes d'étude évoqués précédemment - structure, architecture, croissance, décomposition et détection racinaire - a nécessité une méthodologie et des moyens particuliers. Parmi les techniques présentées dans la première partie, nous en avons retenu certaines pour des raisons pratiques, économiques ou plus fondamentales. Les méthodes d'acquisition et de traitement des données ont été adaptées et améliorées au fur et à mesure de l'avancée des travaux.

Après la présentation des sites d'étude, nous aborderons les techniques utilisées (i) pour l'analyse des systèmes racinaires aux différentes échelles d'observation (structure des souches, architecture des racines et cernes de croissance), (ii) pour celle du phénomène de décomposition racinaire et enfin (iii) pour la détection des systèmes de racines.

Afin d'éviter les redondances, le développement des parties « Matériels et Méthodes » exposé dans les différents articles n'est pas détaillé ici. Ce chapitre renvoie vers les paragraphes des articles ou projets d'articles correspondants après une brève description des objectifs et méthodes appliquées.

1. Les sites d'étude

1.1. Localisation des sites d'interventions

Les huit sites d'étude sont essentiellement localisés dans le quart Sud-Est du territoire français. Les digues ont été principalement étudiées, avec trois sites sur les aménagements hydroélectriques du Rhône (à Donzère, Montélimar et Lyon), quatre autres sur les digues de protection contre les crues de fleuves et rivières (à Grenoble, Cosne-sur-Loire et Pertuis) ou de torrents (digue de fermeture du barrage de Castérino) et enfin un barrage situé à Saint-Jean-de-Bournay (barrage de Monjoux : Figure II.1).

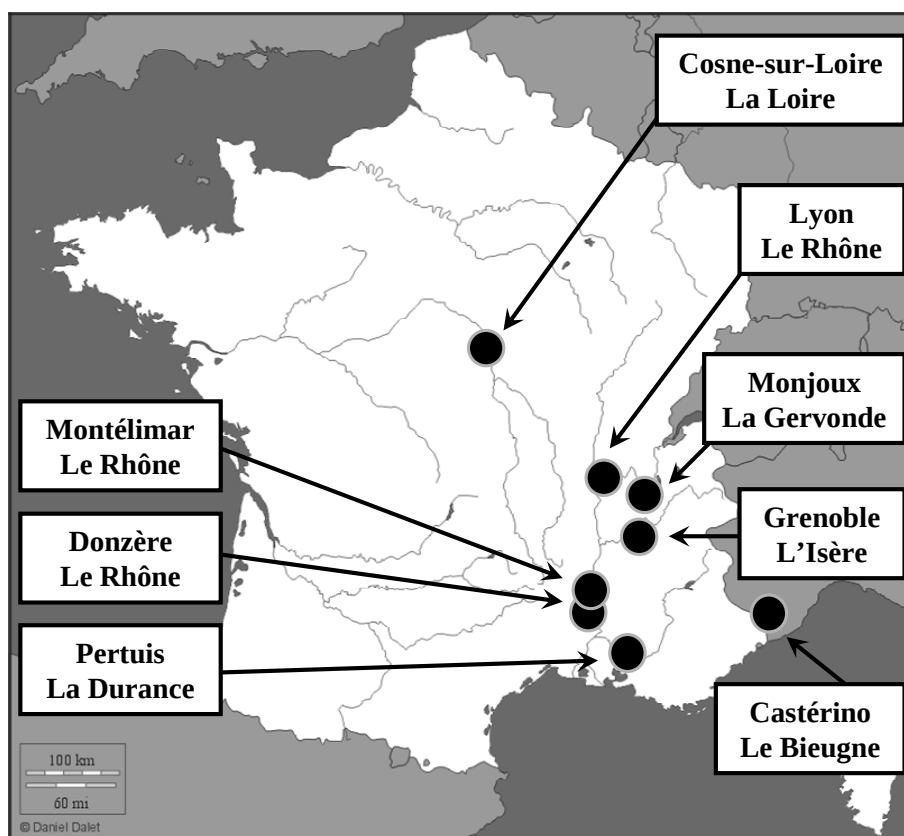


Figure II.1 : Localisation des 8 sites d'étude

1.2. Présentation et caractéristiques des sites

Onze espèces végétales (*Alnus glutinosa* L., *Acer campestre* L., *Acer negundo* L., *Fraxinus excelsior* L., *Larix decidua* Mill., *Pinus sylvestris* L., *Populus nigra* L. ou hybride, *Quercus ilex* L., *Quercus pubescens* Willd., *Robinia pseudoacacia* L., *Salix alba* L.) ont été étudiées. Au total, l'enracinement de 112 arbres matures (âge moyen de 35 ans) implantés sur différents types d'ouvrages a été analysé (Tableau II.1).

Les caractéristiques concernant les 8 sites d'études (type d'ouvrage, date de construction, propriétés et dimensions, constitution du remblai, propriétés des matériaux, état de boisement) ainsi que les caractéristiques des arbres étudiés sont détaillées ci-après.

Certaines interprétations de nos résultats s'appuient sur les études antérieures réalisées de 2001 à 2006 sur d'autres tronçons des digues du Rhône et de l'Isère.

Site d'étude	Date	Type de digue	Nombre d'arbres étudiés	Espèces végétales	Age des arbres [min ; max]	Age moyen des arbres
Donzère Montélimar	Avril 2007	Digues de canaux du Rhône	14	Quercus pubescens, Quercus ilex, Robinia pseudoacacia, Populus nigra	[8 ; 43]	26
Lyon	Juillet 2007	Digues de canaux du Rhône	33	Acer campestre, Fraxinus excelsior, Populus nigra, Quercus pubescens, Robinia pseudoacacia, Alnus glutinosa	[10 ; 63]	35
Pertuis	Juin 2007	Digues de protection contre les crues de la Durance	5	Populus nigra, Quercus pubescens	/	/
Grenoble	Avril 2008	Digues de protection contre les crues de l'Isère	26	Fraxinus excelsior, Populus nigra, Quercus pubescens, Robinia pseudoacacia, Salix alba	[8 ; 49]	25
Cosne-sur-Loire	Octobre 2008	Digues de protection contre les crues de la Loire	22	Acer negundo, Fraxinus excelsior, Populus nigra, Quercus pubescens, Robinia pseudoacacia, Salix alba	[18 ; 45]	31
Castérino	Juin 2009	Digue de fermeture de barrage - le Bieugne	8	Larix decidua, Pinus sylvestris	[46 ; 71]	62
Monjoux	Février 2010	Barrage écretteur de crue - La Gervonde	4	Populus nigra., Fraxinus excelsior	/	/
Nombre d'arbres total			112	Alnus glutinosa, Acer sp., Fraxinus excelsior, Larix decidua, Pinus sylvestris, Populus sp., Quercus sp., Robinia pseudoacacia, Salix alba	[8 ; 71]	35

Tableau II.1: Caractéristiques des arbres étudiés sur chaque site d'étude

1.2.1. Donzère et Montélimar

Ces aménagements hydroélectriques ont été réalisés en 1952 (Donzère) et en 1957 (Montélimar - Photo II.1), l'âge des arbres sur ces digues est ainsi inférieur à 50-55 ans.

Ces digues se caractérisent par des dimensions importantes : environ 10 m de hauteur, 10 m de largeur en crête et de 50 à 80 m de largeur à la base.

Au total, 14 arbres et 12 souches en décomposition ont été excavés et analysés. Les travaux in situ ont été réalisés en avril/mai 2007.



Photo II.1: Digue du canal du Rhône à Montélimar (RG)

▪ Secteurs d'étude sur les digues du canal d'amenée de Donzère

Sur le secteur A (rive gauche - RG), en amont de l'usine hydro-électrique de Bollène (Figure II.2), quatre souches mortes de peupliers et robiniers ont été sélectionnées. Sur le secteur B (rive droite - RD), en amont de la centrale de production nucléaire du Tricastin, (Figure II.2) il s'agit de trois chênes verts sur pied et de deux souches de peupliers. Les caractéristiques des individus sélectionnés sont synthétisées dans le Tableau II.2.

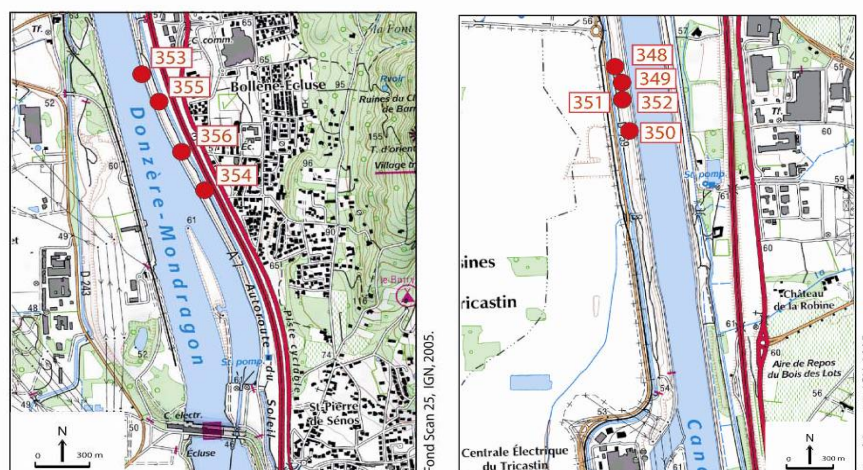


Figure II.2 : Secteur d'étude sur Donzère (A à gauche, B à droite)

Secteur B (RD - PK 181.8 / 182.550) Hauteur de la digue: 9 m. Largeur à la base du parement aval : 45m

N°	PK	Espèce	Age	Position	Type	DBH	D collet	H	Pt GPS
Arbre1	181,9	Ch V	22	pied	franc pied double	24 + 21	36	8,7	348
Arbre2	182,3	Ch V	43	milieu	franc pied	41	45	8,1	349
Arbre3	182,5	Ch V	38	haut	franc pied double	28 + 24	40	6,4	350
Souche1	182,4	PN	/	milieu	/	/	20	/	351
Souche2	182,4	PN	/	milieu	/	/	15	/	352

Secteur A (RG - PK 185.600 / 186.300) Hauteur de la digue : 7 m. Largeur à la base du parement aval : 20m

N°	PK	Espèce	Age	Position	Type	DBH	D collet	H	Pt GPS
Souche3	185,6	Rob	/	milieu	/	/	60	/	353
Souche4	186,4	PN	/	pied	/	/	150	/	354
Souche5	185,7	PN	/	milieu	/	/	70	/	355
Souche6	185,8	PN	/	pied	/	/	110	/	356

Espèce : Chêne Vert, Robinier, Peuplier Noir / Position : pied, milieu, haut de parement/ DBH : diamètre en cm à 1,30 m (sauf souche : à la base) / D collet : en cm / H : Hauteur (m)

Tableau II.2 : Caractéristiques des arbres et souches sélectionnés sur les secteurs de Donzère

▪ Secteurs d'étude sur les digues du canal d'aménée de Montélimar

Sur le secteur C (RG), en amont immédiat de l'usine hydro-électrique de Châteauneuf-du-Rhône, (Figure II.3), cinq chênes blancs sur pied de différentes classes d'âge ont été sélectionnés. Sur le secteur D (RD), en aval du siphon du Roubion (Figure II.3), il s'agit essentiellement de robiniers (cinq sujets). Sur le secteur E (RD), en amont de l'usine hydro-électrique de Châteauneuf-du-Rhône (Figure II.3), cinq souches mortes de robiniers et peupliers ont été identifiées.

Les caractéristiques des individus sélectionnés sont synthétisées dans le Tableau II.3.

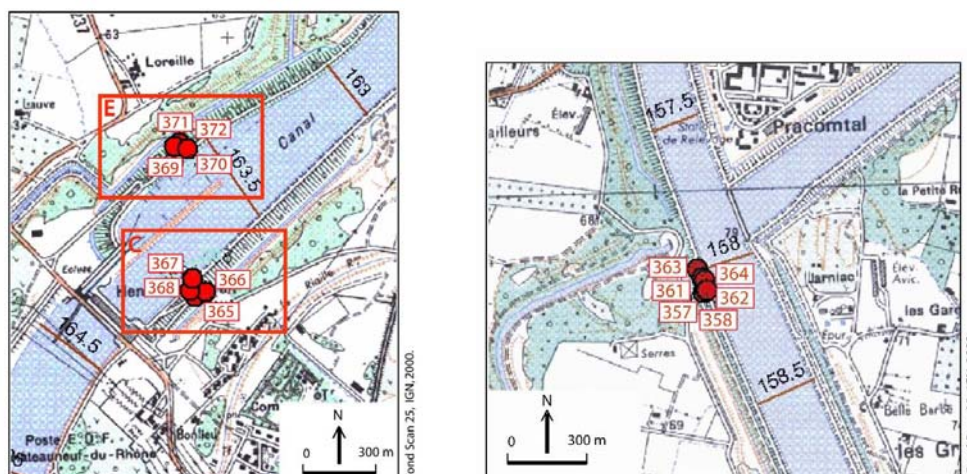


Figure II.3 : Secteurs d'étude sur Montélimar (C et E à gauche et D à droite)

Secteur C (RG - PK 163.6) Hauteur de la digue: 14 m. Largeur à la base du parement aval : 55m

N°	PK	Espèce	Age	Position	Type	DBH	D collet	H	Pt GPS
Arbre 5	163,6	Ch B	26	pied	rejet	14	21	6,4	365
Arbre 6	163,6	Ch B	15	pied	franc pied	8	11	3,4	366
Arbre 7	163,6	Ch B	30	haut	franc pied	19	22	10,5	367
Arbre 8	163,6	Ch B	19	haut	franc pied	6	12	2,1	368
Arbre 9	163,6	Ch B	8	pied	franc pied	6	5	1,30	366

Secteur D (RD - PK 158.5) Hauteur de la digue: 10 m. Largeur à la base du parement aval: 30m

N°	PK	Espèce	Age	Position	Type	DBH	D collet	H	Pt GPS
Arbre 1	158,5	Rob	40	pied	franc pied arbres coupés en 2006	/	36	/	357
Arbre 2	158,5	Rob	40	pied		/	33	/	357
Arbre 3	158,5	Rob	40	haut		/	35	/	361
Arbre3 bis	158,5	Rob	40	haut		/	40	/	363
Arbre 4	158,5	Rob	40	pied		/	30	/	362
Souche 1	158,5	PN	/	milieu	/	/	70	/	358

Secteur E (RD - PK 163.6) Hauteur de la digue : 11m. Largeur à la base du parement aval : 55m

N°	PK	Espèce	Age	Position	Type	DBH	D collet	H	Pt GPS
Souche 2	163,6	PN	/	milieu	/	/	40	/	369
Souche 3	163,6	PN	/	pied	/	/	37	/	370
Souche 4	163,6	PN	/	pied	/	/	35	/	371
Souche 5	163,6	Rob	20	haut	/	/	18	/	372
Souche 6	163,6	Rob	25	haut	/	/	15	/	372

Espèce : Chêne Blanc, Robinier, Peuplier Noir / Position : pied, milieu, haut de digue / D BH : diamètre en cm à 1,30 m (sauf souche : à la base) / Dcollet : en cm / H : Hauteur (m)

Tableau II.3 : Caractéristiques des arbres et souches pourries sélectionnés sur les secteurs de Montélimar

La Figure II.4 présente la granulométrie des matériaux prélevés au droit de certains arbres étudiés (cf. protocole de prélèvement et d'analyse des matériaux au point II.2.1.3). Il s'agit essentiellement de matériaux sablo-graveleux (matériaux grossiers aux propriétés drainantes).

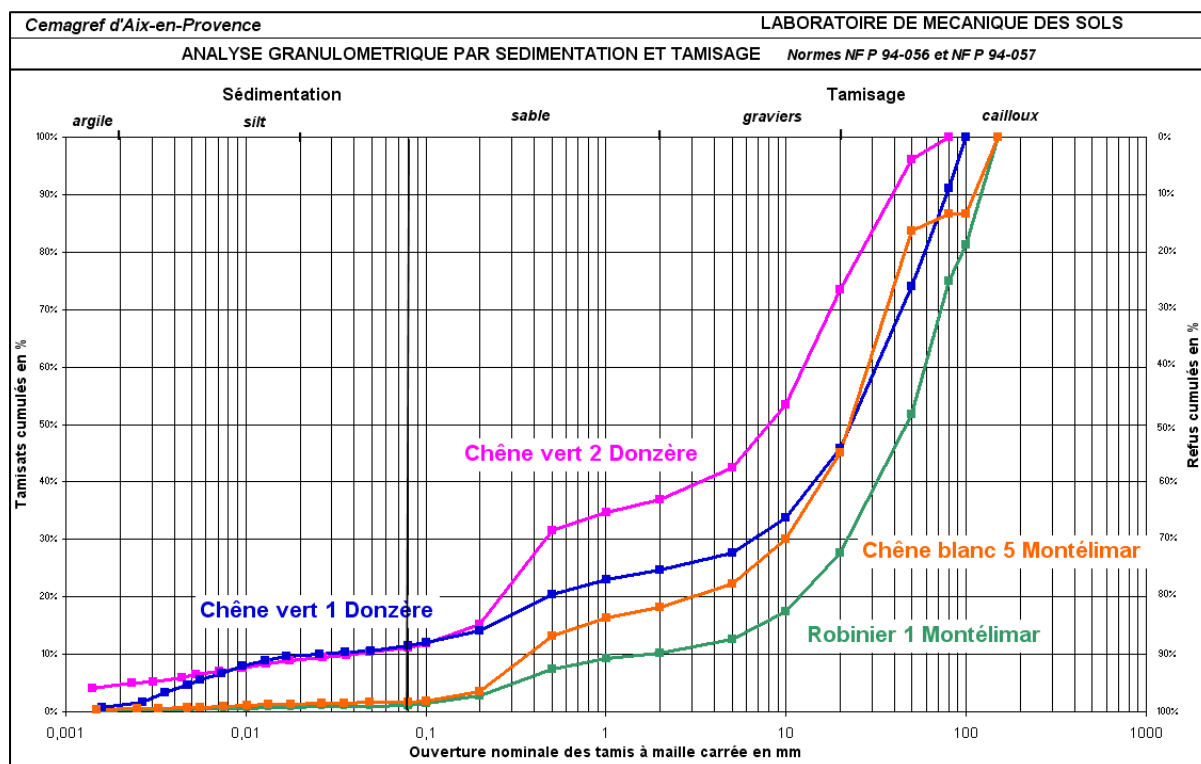


Figure II.4 : Courbes granulométriques des matériaux représentatifs de la constitution des digues de Donzère et Montélimar (le nom des courbes correspond à l'espèce et au numéro des arbres)

1.1.2. Lyon

La digue (RD) du canal de Jonage, située à l'Est de Lyon, a été mise en service en 1897. L'ouvrage est fortement végétalisé et se caractérise par la présence de souches vives et mortes très anciennes (Photo II.2). Les archives mentionnent la plantation de robiniers lors de la construction de l'ouvrage, les souches peuvent par conséquent être âgées d'une centaine d'années.

La digue s'élève plus ou moins progressivement de l'amont vers l'aval (0 à 12 m de hauteur relative au dessus du terrain naturel) et présente un profil large et régulier (largeur de 6 à 8 m en crête et supérieure à 60 m à la base), avec des pentes de talus de l'ordre de 1V/3H. Le corps de digue est essentiellement constitué de matériaux sablo-graveleux d'origine alluviale avec des passées sablo-limoneuses par endroits. Le parement côté canal est formé d'un masque imperméable en argile et chaux et dispose d'un perré bétonné de protection contre le battillage. Une roselière et des petits arbres se sont installés sur les dépôts recouvrant fréquemment ce parement. Sur le talus aval (côté plaine alluviale), une couche de sol s'est développée en surface, sur les 30 premiers centimètres.

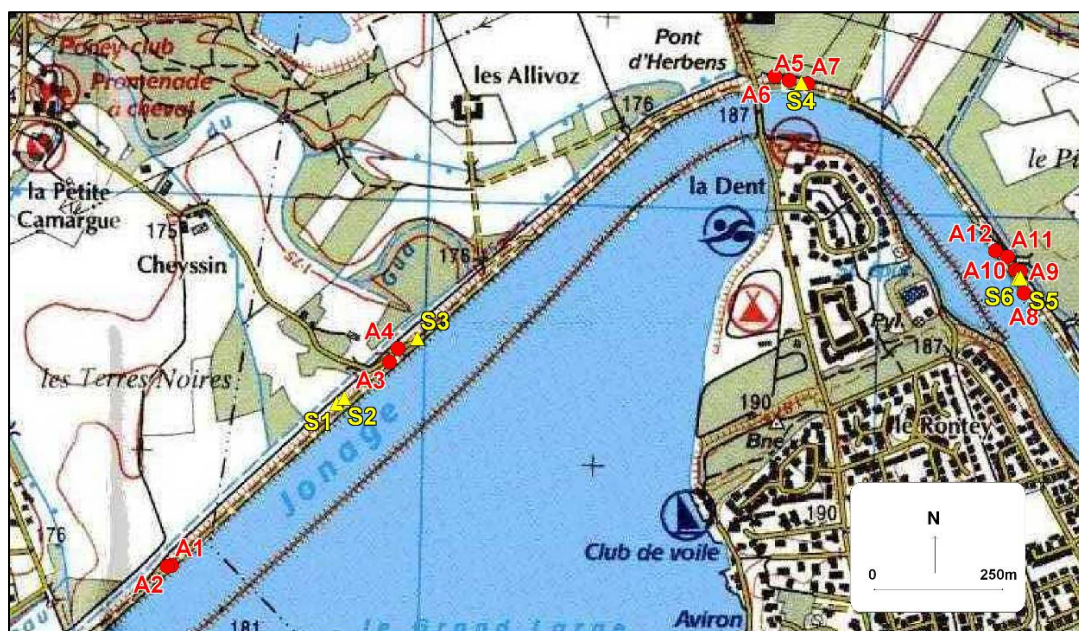
De nombreux désordres ont été répertoriés sur cet ouvrage depuis sa construction, tels que fuites, fontis* ou phénomènes de boulanges*, traduisant des problèmes d'étanchéité et d'écoulements internes dans le remblai ou sa fondation. Ces désordres ont fait à chaque fois l'objet de travaux par le maître d'ouvrage (étanchéité par écran mince, recharge aval).

Notre chantier s'est déroulé en deux phases : la première en juillet 2007 sur le parement aval, et la seconde en septembre 2008, sur le parement amont (côté canal).

Au total, 33 arbres (19 arbres sur le parement aval et 14 arbres sur le parement amont) ainsi que 6 souches pourries ont été arrachés et analysés (Figure II.5, Figure II.6, Tableau II.4 et Tableau II.5).

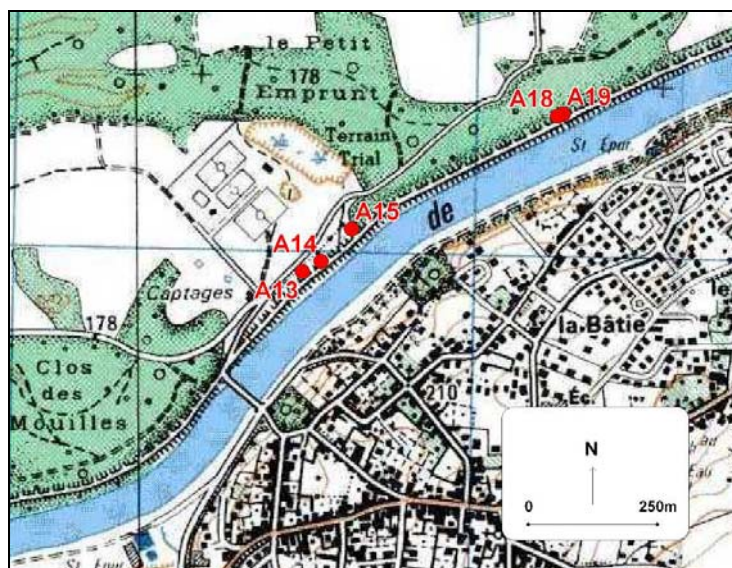


Photo II.2 : Digue du canal du Rhône à Lyon (RD)



(Carte topographique Lyon Villeurbanne, IGN, 1/25000, 2000)

Figure II.5 : Localisation des arbres sur le parement aval, secteur 1 et 2



(Carte topographique Meyzieu, IGN, 1/25000, 1993)

Figure II.6 : Localisation des arbres sur le parement aval, secteur 3

Secteur 1 [PK 10,5 à 9,75] 4 arbres - 3 souches							
N° (validés)	Position (sur talus)	Espèce	Gabarit (souche)	Diamètre (cm)	Hauteur (m)	Type (arbre)	Age (rejet ou franc pied)
A1	Milieu	Robinier	Grosse	21	10	Rejet	29
A2	Milieu	Frêne	Grosse	31,5	9	Rejets x2	/
A3	Haut	Robinier	Moyenne	24	8,7	Rejet	20
A4	Milieu	Robinier	Grosse	22,5	6,5	Rejet	/
S1	Milieu	Peuplier	Grosse	70	/	/	/
S2	Milieu	Peuplier	Enorme creuse	124	/	/	/
S3	Haut	Robinier	Petite	29	/	/	/
Secteur 2 [PK 8,8 à 8,1] 8 arbres - 3 souches							
N° (validés)	Position (sur talus)	Espèce	Gabarit (souche)	Diamètre (cm)	Hauteur (m)	Type (arbre)	Age (rejet ou franc pied)
A5	Haut	Frêne	Moyenne	22	8	Rejets x2	27
A6	Haut	Frêne	Moyenne	26,5	8,8	Rejet	26
A7	Pied	Erable	Moyenne	24	11	Rejet	33
S4	Pied	Er ou Fr	Moyenne x2	64	/	/	/
A8	Haut	Frêne	Grosse	33 et 23,5	9,1	Rejets x2	/
A9	Pied	Erable	Moyenne	24	10	Rejet	30
A10	Pied	Frêne	Moyenne	31	9,5	Rejet	/
A11	Pied	Frêne	Grosse	15, 16 et 24	11,3	Rejets x3	/
A12	Haut	Erable	Moyenne	21,5	11,1	Rejet	38
S5	Haut	Robinier	Petites x2	15 et 22	/	/	/
S6	Pied	Robinier	Moyennes x2	39	/	/	/
A5bis	Haut	Frêne	Petite	/	/	Rejet	/
A6bis	Haut	Frêne	Petite	/	/	Rejet	/
Secteur 3 [PK 3,8 à 3,2] 5 arbres							
N° (validés)	Position (sur talus)	Espèce	Gabarit (souche)	Diamètre (cm)	Hauteur (m)	Type (arbre)	Age (rejet ou franc pied)
A13	Milieu	Chêne B	Grosse	57,5	16,1	Franc pied	60
A14	Milieu	Chêne B	Petite	19,5	9,9	Franc pied	30
A15	Pied	Peuplier	Grosse	45	21,5	Franc pied	55
A18	Milieu	Chêne P	Moyenne	27	16,6	Franc pied	63
A19	Milieu	Peuplier	Grosse	44	21,3	Rejet	27

Tableau II.4: Synthèse des caractéristiques des arbres et souches pourries extraits sur le parement aval de la digue du canal de Jonage

N° de souche	Ref terrain	Espèce	Secteur	Situation	Diamètre des rejets (cm)	Age du plus gros rejet
1	2	Aulne	Perré	Sur le perré	8+6+5+4+4	5
2	3	Aulne	Perré	Sur le perré	14+9+8+8+8	7
3	4	Frêne	Perré	Sur le perré	6+5+4+4+3+2	5
4	5	Cornouiller	Perré	Sur le perré	nombreux petits rejets	/
5	6	Cornouiller	Perré	Sur le perré	nombreux petits rejets	/
6	7	Aulne	Perré	Sur le perré	11+4+3	5
7	8	Aulne	Perré	Bord d'eau Sur roseaux	10+7	5
8	10	Aulne	Perré	Bord d'eau Sur roseaux	12+10+10+8+7+4	6
9	11	Aulne	Perré	Bord d'eau Sur roseaux	10+6+5+4+3+2	5
10	12	Aulne	Enrochements	Bord d'eau	10+10+10+4+4	6
11	16	Aulne	Enrochements	Bord d'eau	14+11+9+6+3+3+3	5
12	19	Aulne	Enrochements	Bord d'eau	10+9+8+6+4+2	5
13	24	Erable	Enrochements	Bord d'eau	7+8	9
14	25	Frêne	Enrochements	Bord d'eau	15 (Franc pied)	8

Tableau II.5 : Synthèse des caractéristiques des arbres et arbustes arrachés sur le parement amont de la digue du canal de Jonage

La Figure II.7 présente la granulométrie des matériaux rencontrés dans le remblai : principalement des sols sablo-graveleux (Robinier 1 et Peuplier 19), avec quelques secteurs ayant une teneur en matériaux fins plus élevée.

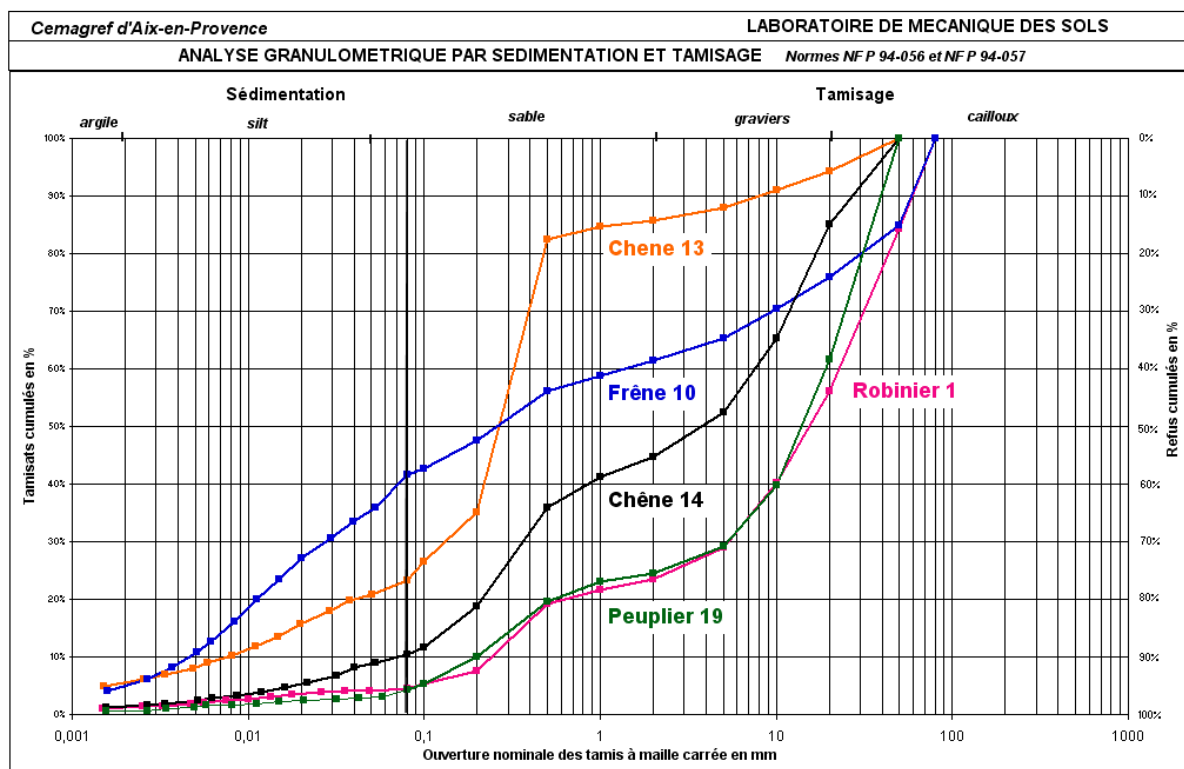


Figure II.7 : Courbes granulométriques des matériaux représentatifs de la constitution de la digue du canal de Jonage (parement aval)

1.1.3. Pertuis

Il s'agit de la digue rive droite du « Père Grand Amont » qui protège le sud de la ville de Pertuis des crues de la Durance (Figure II.8). En 1994, une rupture par surverse a eu lieu lors d'une crue d'occurrence trentennale ($3000 \text{ m}^3/\text{s}$). Plus récemment, en 2006-2007, de nombreux terriers de blaireau subhorizontaux pénétrant jusqu'à 2m dans le corps de digue

(limoneuse dans la partie ancienne) ont été repérés. De plus, la présence de très vieux arbres sur le parement côté terre (chênes et peupliers de 80 à 120 cm de diamètre et de plus de 15 m de hauteur), implantés sur le talus très raide (1H/1V), constitue un facteur de risque élevé. Le SMAVD et la commune de Pertuis se sont engagés dans la restructuration complète de la digue sur le secteur du Père Grand en rive droite de la Durance. L'objectif est de conforter les digues, de régulariser leur tracé en plan et, si possible, d'éloigner les ouvrages de la rivière afin de redonner de la mobilité au cours d'eau.

Les travaux de confortement se sont déroulés en juin 2007 et ont permis :

- la purge du talus côté terre sur une largeur de 2 à 3 mètres, comprenant notamment le dessouchage des gros arbres et un talutage du talus côté terre à 3H/2V ;
- la réalisation d'un dispositif de drainage du talus côté terre ;
- l'élargissement de la digue du côté rivière par réalisation d'un remblai compacté, de manière à disposer d'une largeur en crête de 8,50 m pouvant accepter une rehausse future de 1m,
- la pose d'un dispositif anti-fouisseur sur les talus de l'ouvrage.

Le Cemagref a tiré profit de ces travaux pour examiner lors du chantier les systèmes racinaires des gros arbres. Trois peupliers et deux chênes ont été étudiés sur ce secteur. Les matériaux étaient principalement limono-graveleux (Figure II.9).

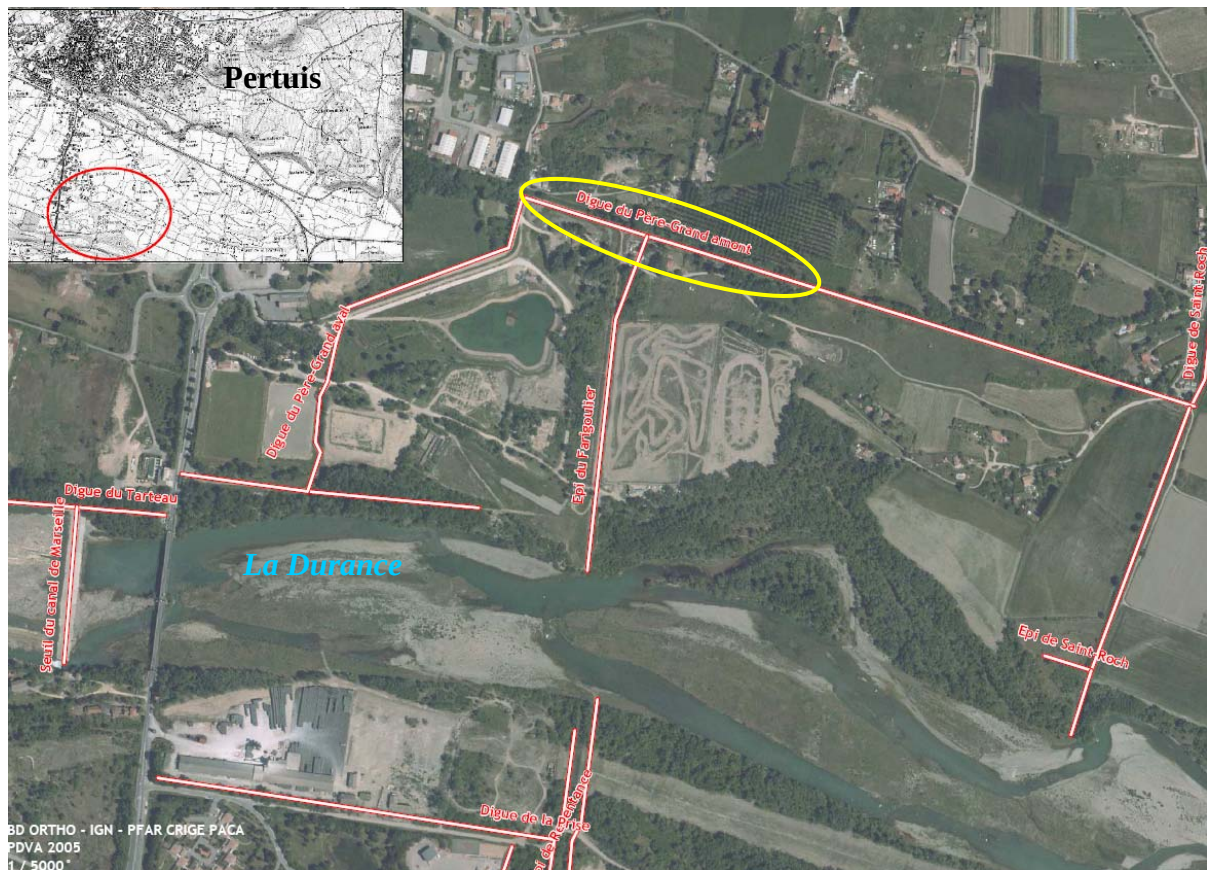


Figure II.8 : Situation de la Digue du Père Grand à Pertuis

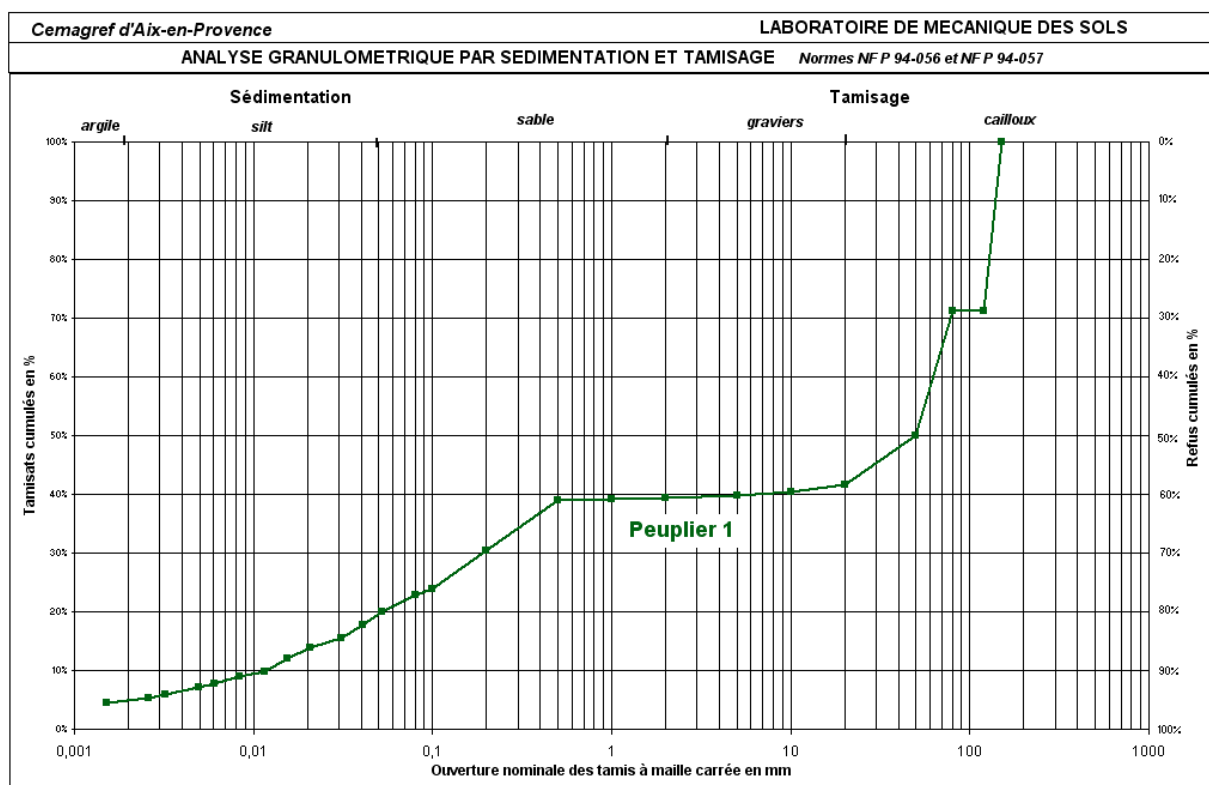


Figure II.9 : Courbe granulométrique des matériaux représentatifs de la constitution du talus côté terre de la digue de protection contre les crues de la Durance à Pertuis

1.2.4. Grenoble

Les digues de l'Isère ont été édifiées au 19^{ème} siècle et rehaussées entre 1950 et 1970. Elles sont étroites (3 m en crête), ont des talus excessivement raides (1H/1V - bien souvent dans le prolongement de la berge érodable côté rivière et grignotés par les champs côté terre - Photo II.3). L'Association Départementale (AD) Isère-Drac-Romanche assure la surveillance et l'entretien du réseau de 215 km de digues, réparti sur 61 communes.

Un plan de gestion de la végétation réalisé par le Cemagref en 2003, suite à une première étude sur l'enracinement des arbres dans les digues, est en cours d'application et certains tronçons de digues ont été confortés.

Une étude plus détaillée a été réalisée en avril 2008, dans le cadre de cette thèse. Une trentaine d'arbres a été sélectionnée en concertation avec l'AD (Figure II.10 et Tableau II.6). Un dispositif expérimental a été mis en place afin de pouvoir suivre la décomposition des racines.

Les digues sont constituées de matériaux non compactés (sablo-graveleux avec des passées limoneuses – Figure II.11) et présentent un boisement dense avec de très vieilles souches.



Photo II.3 : Digue de l'Isère à Tencin

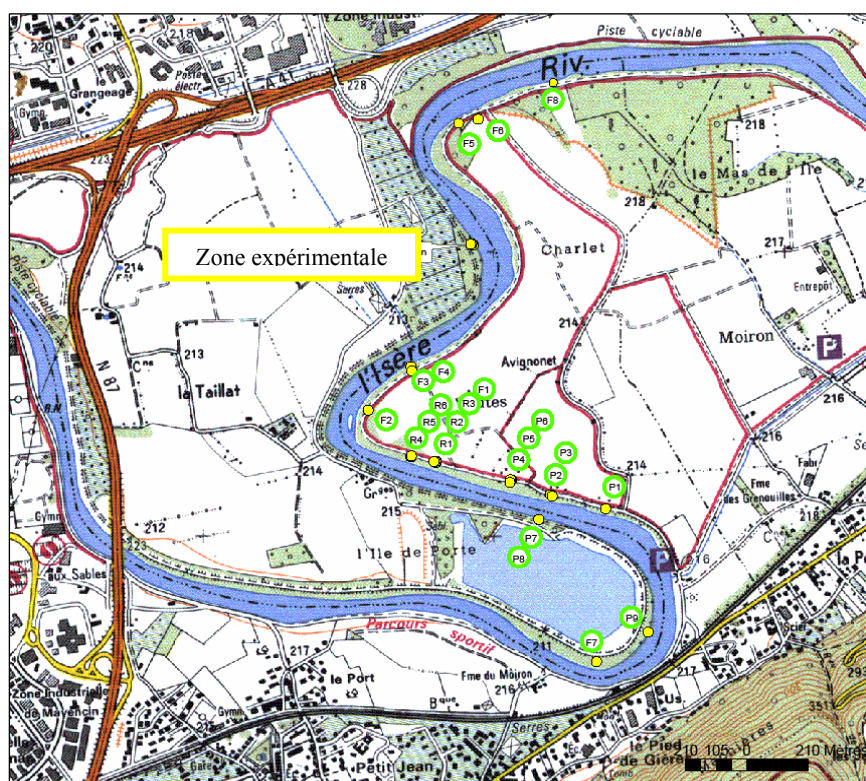


Figure II.10 : Localisation des arbres sélectionnés (cercles verts) et de la zone d'expérimentation

Secteur : Gières

Pr 470 à 446

Code	Loc	PrK	Espèce	Gabarit	Position	Type	D (cm) collet	DBH (cm)	H (m)	Age	Pt GPS	Statut
P1	RG / CR	40m am 470	Peuplier	moyen	milieu	Franc-pied	85	48+50	30	/	397	Annulé
P2	RG / CR	30m av 468	Peuplier	moyen	milieu	Franc-pied	88	72	26	/	398	Annulé
P3	RG / CR	25m am 468	Peuplier Blanc	moyen	milieu	Franc-pied	87	77	23	/	400	Annulé
P4	RG / CR	35m am 468	Peuplier	gros	milieu	Franc-pied	124	96	26	/	399	Arraché et remblayé
P5	RG / CR	466	Peuplier	énorme	milieu	Rejet	150	80x2	20	/	401	Mesuré
P6	RG / CR	10m am 466	Peuplier	énorme	milieu	Rejet	150	80x3	31	25	403	Mesuré
F1	RG / CR	130m av 462	Frêne	petit	milieu	Franc-pied	42	20x2+10	7	21	404	Mesuré
R1	RG / CR	130m av 462	Robinier	moyen	milieu	Franc-pied	70	25+31+3 2	26	22	405	Mesuré
R2	RG / CR	130m av 462	Robinier	moyen	milieu	Franc-pied	55	42	28	23	406	Mesuré
R3	RG / CR	130m av 462	Robinier	moyen	milieu	Franc-pied	58	48	18	23	407	Mesuré
R4	RG / CR	40m av 462	Robinier	moyen	haut	Rejets	32	24+15	19	25	408	Mesuré
R5	RG / CR	40m av 462	Robinier	moyen	haut	Rejets	55	19+28+2 5	20	24	409	Mesuré
R6	RG / CR	40m av 462	Robinier	moyen	haut	Rejets	70	24+30+2 0+16	20	24	410	Mesuré
F2	RG / CT	65m av 458	Frêne	moyen	haut	Rejets	50	16+21+2 4+10x3	12	/	411	Mesuré
F3	RG / CR	150m av 456	Frêne	moyen	milieu	Rejets	65	24+28+2 1	16	27	412	Non Mesuré
F4	RG / CR	150m av 456	Frêne	petit	haut	Rejets	20	15	/	/	413	Mesuré
F5	RG / CR	120m av 448	Frêne	gros	haut	?	70	45+44	25	34	414	Non Mesuré
F6	RG / CR	120m av 448	Frêne	moyen	milieu	Franc-pied	64	45	25	30	415	Mesuré
F8	RG / CR	446	Frêne	gros	milieu	Rejets	/	/	/	/	424	Annulé

Secteur : Taillat

Pr 470 à 482

N°	Loc	Pr	Espèce	Gabarit	Position	Type	D (cm) base	DBH (cm)	H (m)	Age	Pt GPS	Statut
P7	RD / CR	50m am 470	Peuplier	gros	berge	Rejets	110	/	/	/	420	Annulé
P8	RD / CR	50m am 470	Peuplier	gros	berge	Rejets	81	/	/	43	421	Mesuré
P9	RD / CR	482	Peuplier Blanc	moyen	berge	Franc-pied	61	50	23	11	422	Mesuré
F7	RD / CR	486	Frêne	gros	berge	Rejets	80	36+38+2 5	23	49	423	Mesuré
F9	RD / CR	482	Frêne	moyen	berge	Franc-pied	43	36	20	39	435	Mesuré
S1	RD / CR	482	Saule	petit	berge	Franc-pied	26	21	10	8	436	Mesuré
S2	RD / CR	482	Saule	petit	berge	Franc-pied	19	14	10	/	438	Pas mesurable
S3	RD / CR	482	Saule	moyen	berge	Franc-pied	37	33	13	11	439	Mesuré
S4	RD / CR	482	Saule	petit	berge	Franc-pied	25	21	10	10	440	Pas mesurable
S5	RD / CR	482	Saule	petit	berge	Franc-pied	18	16	10	9	441	Pas mesurable

Secteur : Tencin

N°	Loc	Pr	Espèce	Gabarit	Position	Type	D (cm) base	DBH (cm)	H (m)	Age	Pt GPS	Statut
C1	RG / CR	58m am 162	Chêne	moyen	haut	Franc-pied	56	42	/	53	432	Non Mesuré
C2	RG / CR	50m am 162	Chêne	moyen	haut	Franc-pied	45	31+22	/	50	433	Non Mesuré

(PrK : Profil Kilométrique AD / DBH : Diamètre à 1.30m)

Tableau II.6 : Références des arbres sélectionnés sur les digues de l'Isère

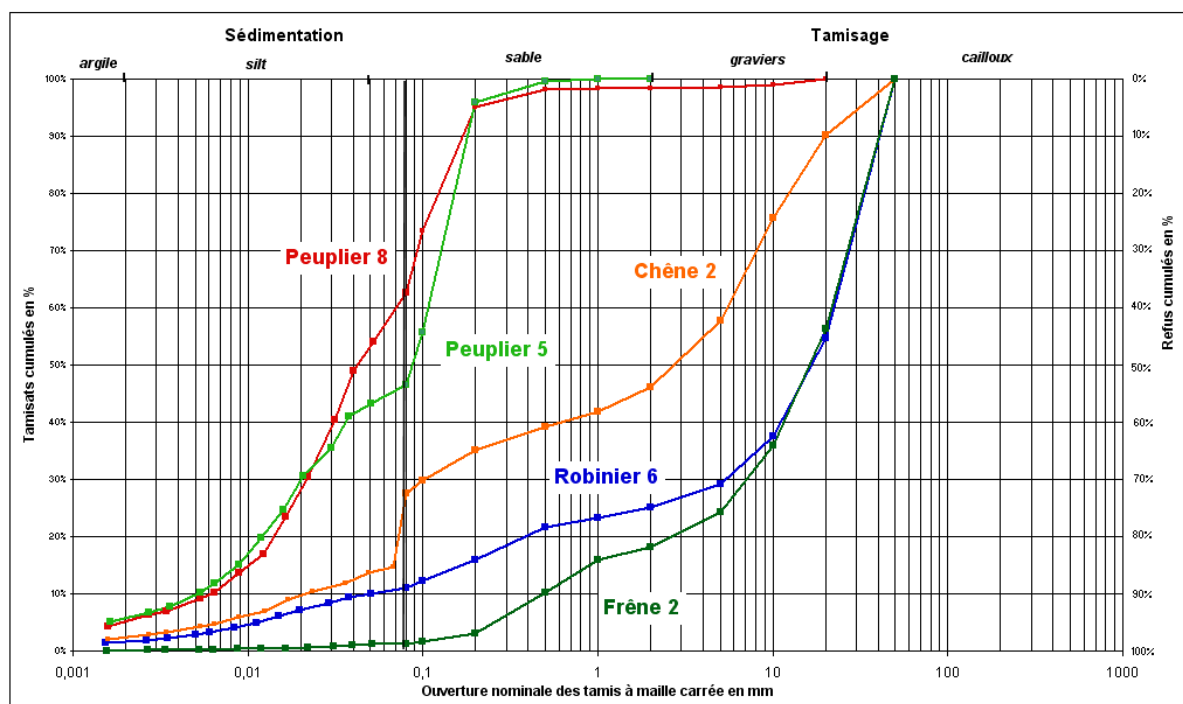


Figure II.11 : Courbes granulométriques des matériaux représentatifs de la constitution de la digue de l'Isère sur les différents secteurs d'étude

1.2.5. Cosne-sur-Loire

Le site se localise sur une levée de la Loire à proximité de Cosne-sur-Loire dans la Nièvre (Figure II.12). Il s'agit d'un ouvrage créé initialement pour protéger les terres agricoles des inondations. Confortées après chaque grande crue historique (1790, 1846, 1856, 1866, 1907), ces digues protègent aujourd'hui les zones urbaines contre les hautes eaux de la Loire. Elles sont densément boisées (Figure II.13 et Photo II.4) et les remblais sont constitués de matériaux extraits de la rivière, essentiellement sableux sur la zone d'étude (Figure II.14). Le site d'étude se situe en rive droite de la Loire, la digue est séparée du lit principal du fleuve par une lône (Figure II.13).

Les études de terrain ont eu lieu durant les travaux de déboisement des levées dirigés par la Direction Départementale des Territoires (DDT) de la Nièvre, en octobre 2008. Au total, 22 arbres ont été étudiés sur ce site (Tableau II.7).

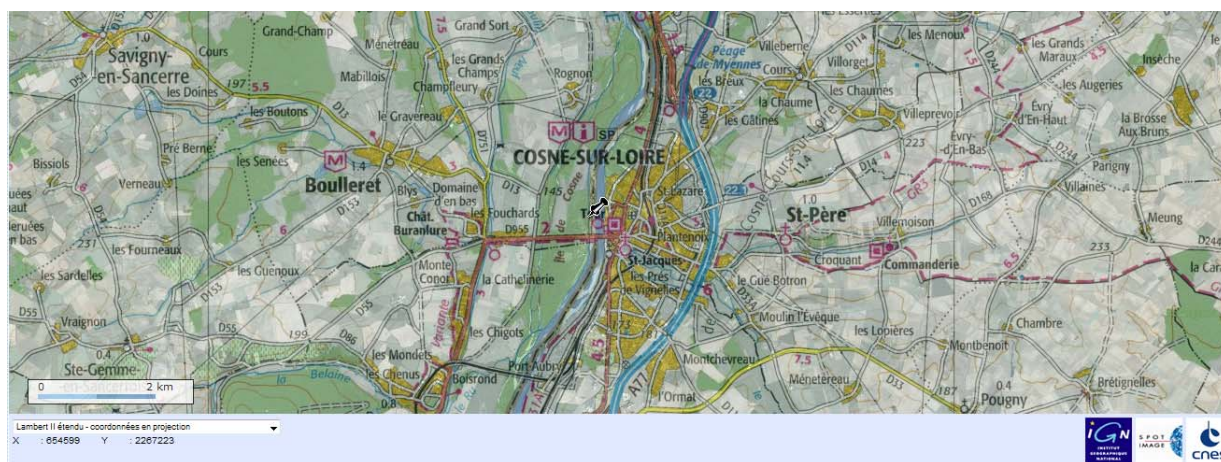


Figure II.12 : Localisation du secteur d'étude sur les levées de la Loire



Figure II.13 : Vue aérienne de la zone d'étude : état de boisement de la levée



Photo II.4 : Levée de la Loire à Cosne-sur-Loire

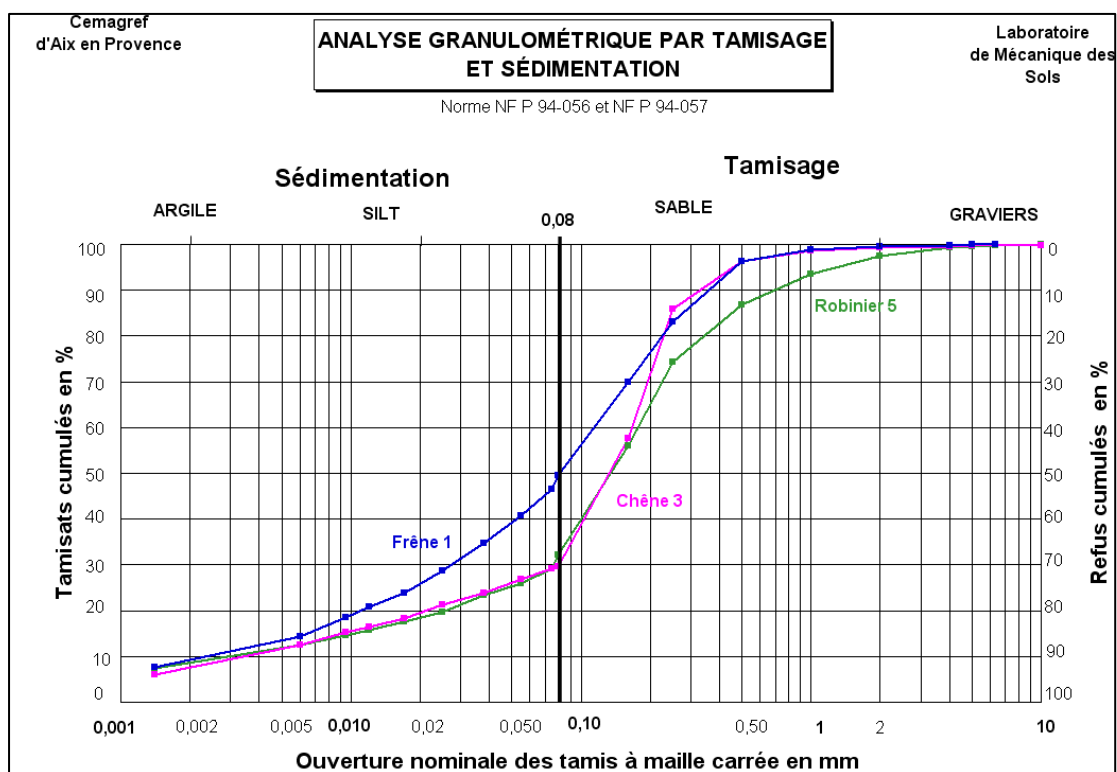


Figure II.14 : Courbes granulométriques des matériaux représentatifs de la constitution de la digue de la Loire sur les différents secteurs d'étude.

N°	PK	Espèce	Gabarit	Position	Type	D (cm) base	DBH (cm)	H (m)	Age
R1R2	3375	Robinier	Gros	Haut	Franc pied	67	58,5	16	44-47
	3375	Robinier	Moyen	Haut	Rejets	73	22/24/10 /22	12	19-21
R3	3375	Robinier	Petit	Pied	Franc pied	35	23	17	19-21
R4	3375	Robinier	Moyen	Pied	Rejets	27+25+25	21/21/18	18,5	19-21
R5	3375	Robinier	Gros	Milieu	Franc pied	65	55	19,5	34-36
C1	3350	Chêne	Gros	Haut	Franc pied	67	46	18	43-45
C2	3350	Chêne	Gros	Haut	Franc pied	80	59	20,5	43-45
C3	3350	Chêne	Moyen	Milieu	Franc pied	47	33	19	39-42
C4	3350	Chêne	Petit	Milieu	Franc pied	36	27,5	21	33-35
C5	3350	Chêne	Gros	Pied	Franc pied	73	53	18	42-45
P1(C2)	300	Peuplier	Gros	Haut	Franc pied	59	44	31	(35-37)
P2	300	Peuplier	Moyen	Haut	Franc pied	75+35	31	29	34-36
P3	300	Peuplier	Gros	Pied	Franc pied	77	60	40	38-42
P4	300	Peuplier	Gros	Pied	Franc pied	64	49	37	25-27
P5	300	Peuplier	Petit	Milieu	Franc pied	/	20	28	?
E1	350	Erable neg	Enorme	Milieu	Franc pied	75	74	21	28-32
E2	350	Erable neg	Moyen	Pied	Franc pied	30	29	26	23-25
E3	350	Erable neg	Petit	Pied	Franc pied	24	19,5	22	19-21
E4	350	Erable neg	Moyen	Pied	Franc pied	60	36/36	19	23-25
E5	350	Erable neg	Gros	Pied	Rejets	32+52	26,5/24, 5/28	18	22-25
F1	350	Frêne	Moyen	Pied	Rejets	50+30	35	15	29-31
S1	350	Saule	Enorme	Berge	Franc pied	120	90	20	24-26

Tableau II.7 : Caractéristiques des arbres étudiés sur les levées de la Loire

1.2.6. Castérino

Ce site se localise sur la digue de fermeture rive droite du barrage de Castérino, sur le torrent du Bieugne (Figure II.15), dans le Parc National du Mercantour, dans la haute vallée de la Roya (Alpes-Maritimes). Cet ouvrage, construit par les Italiens au début du XX^{ème} siècle, fonctionne comme une digue de protection contre les crues, bien que la fonction principale de l'ouvrage soit la fermeture d'un barrage EDF assurant le stockage de sédiments afin de ne pas engraver une prise d'eau de conduite forcée en aval (Figure II.16 et Photo II.5). Le remblai est hétérogène, constitué de blocs calcaires entourés d'une matrice limono-sableuse (Figure II.17).

Deux espèces montagnardes ont été étudiées : le mélèze (*Larix decidua* Mill.) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.). Huit souches au total ont été excavées (Tableau II.8).

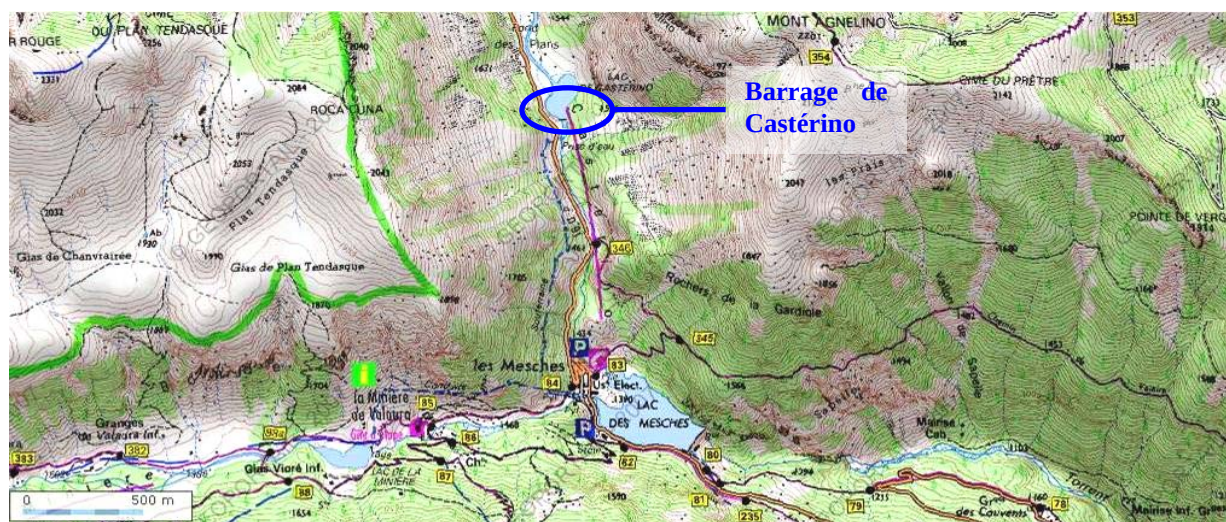


Figure II.15: Localisation du barrage de Castérino

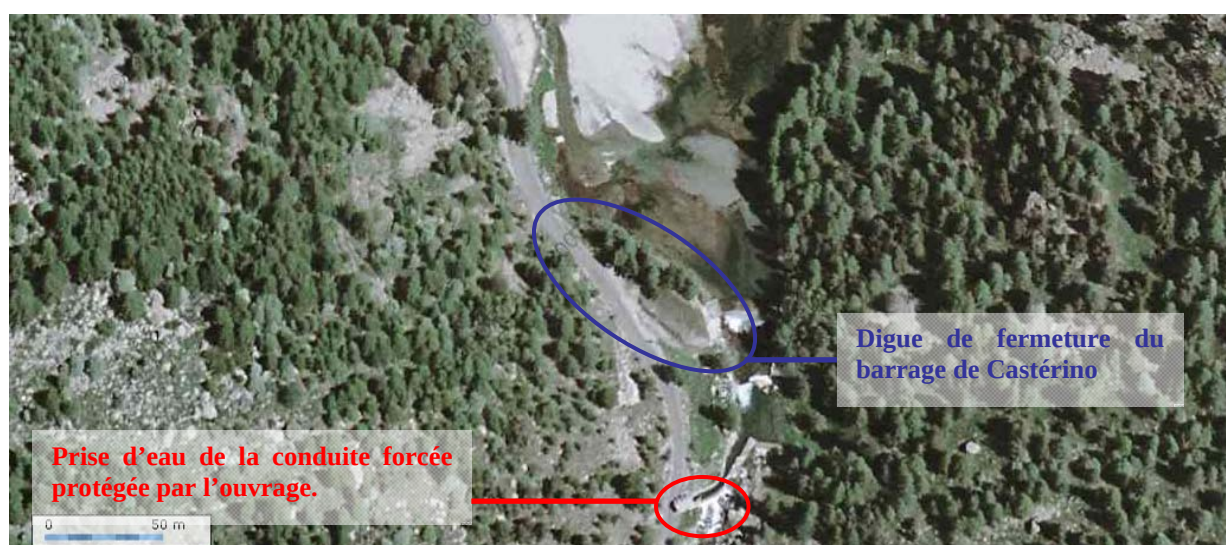


Figure II.16 : Localisation de la digue de fermeture et de la prise d'eau de Castérino



Photo II.5 : Digue de fermeture du barrage de Castérino

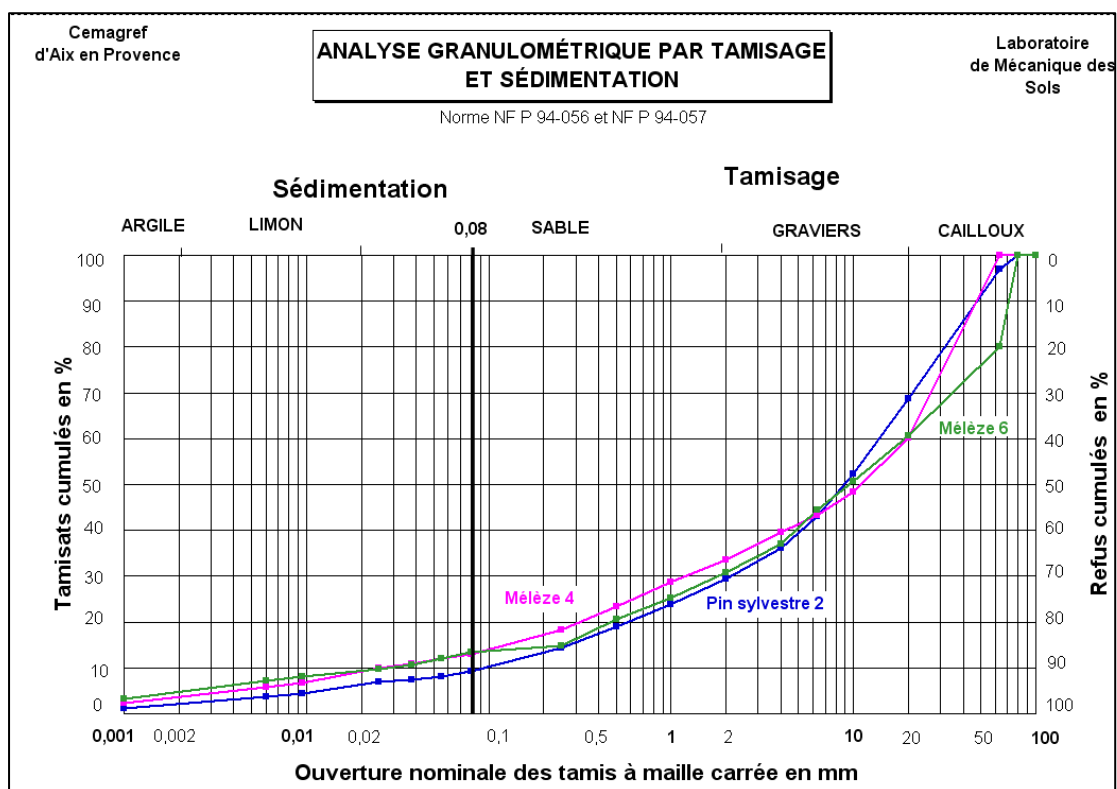


Figure II.17 : Courbes granulométriques des matériaux représentatifs de la constitution de la digue du barrage de Castérino

Site : Catérino Hauteur de la digue = de 0,5 à 3,5 m en parement amont						
N°	Espèce	Gabarit	Position sur la digue	D base (cm)	DBH (cm)	H (m)
1	PS	MOYEN	HAUT	46,5	40	15,3
2	PS	MOYEN	HAUT	58,5	43	12,7
3	PS	PETIT	MILIEU	39	30	11
4	M	GROS	HAUT	73	54,5	18,5
5	M	MOYEN	PIED	56	48,5	19,5
6	M	GROS	HAUT	68,5	56	19,5
4'	M	PETIT	HAUT	41	26	17,1
5'	M	PETIT	HAUT	47,5	33,5	20
6'	M	PETIT	PIED	46	35,5	15,7

PS : Pin Sylvestre — M : Méléze
DBH : Diamètre à 1,30 m — H : Hauteur

Tableau II.8: Références des arbres excavés à Castérino:

1.2.7. Monjoux

Il s'agit du seul barrage sensu stricto que nous ayons étudié au cours de ces travaux. L'étang de Monjoux est fermé par un barrage en terre de 7 m de hauteur construit, au XVII^{ème} siècle sur la rivière Gervonde (Figure II.18). Cet ouvrage a été classé comme "intéressant la sécurité publique" il y a quelques années. Depuis 2002, le Conseil général de l'Isère (CG 38) a acquis l'étang de Monjoux, sur les communes de Saint-Jean-de-Bournay et de Meyrieu-les-Etangs (38), et doit assurer la gestion et l'entretien des ouvrages hydrauliques. Le site accueille de nombreuses espèces floristiques et faunistiques remarquables, en particulier piscicoles et avicoles, et est maintenant préservé et mis en valeur dans le cadre de la politique départementale des espaces naturels sensibles.

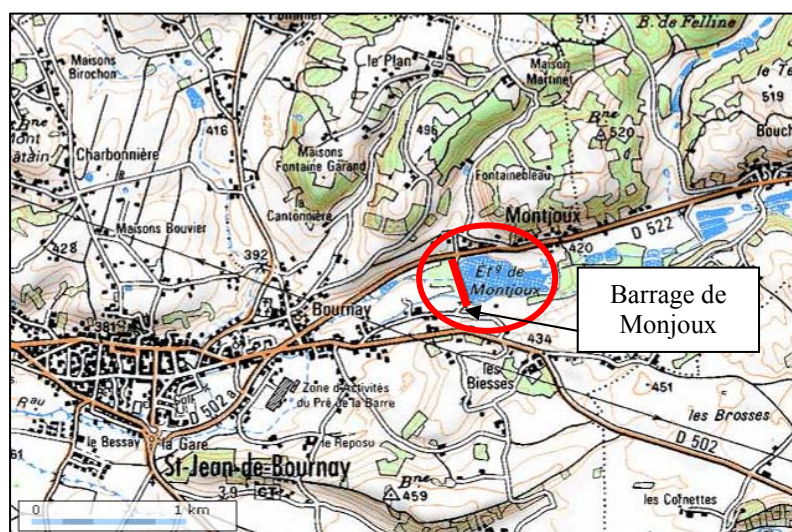


Figure II.18 : Localisation du barrage de Monjoux

Le talus aval est actuellement couvert par un taillis de noisetiers dominé par de grands frênes et érables (Photo II.6). De nombreuses souches en décomposition témoignent de la présence d'arbres sur le parement dont la pente est forte et la topographie irrégulière.

Les matériaux constitutifs sont limono-graveleux, avec une granulométrie discontinue, exposant la fraction fine (inférieure à 0,5 mm) à un risque d'érosion interne en cas de circulations d'eau indésirables (Figure II.19).

Des travaux ont été conduits durant l'hiver 2009/2010 afin de supprimer les gros peupliers implantés en bordure de crête côté parement amont (Photo II.5) et réaliser un évacuateur de crues.

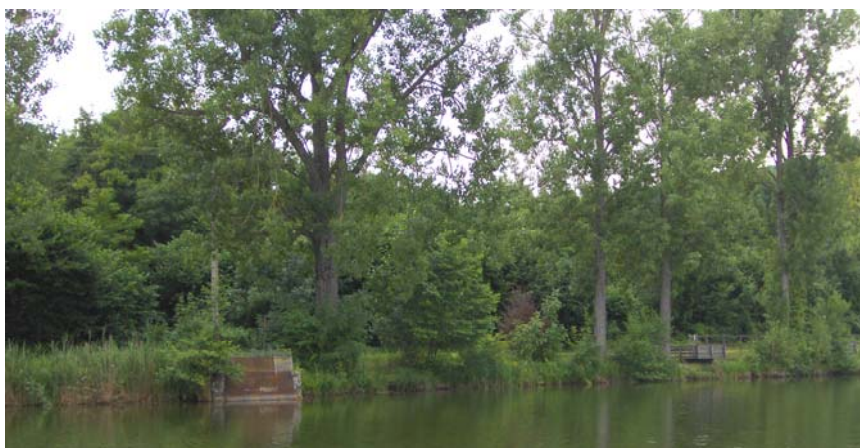


Photo II.6 : Barrage de Monjoux vue depuis la retenue d'eau

Au cours de ces travaux, nous avons pu observer l'enracinement de deux gros peupliers implantés en amont et de deux cépées implantées sur le parement aval, à l'emplacement du futur évacuateur.

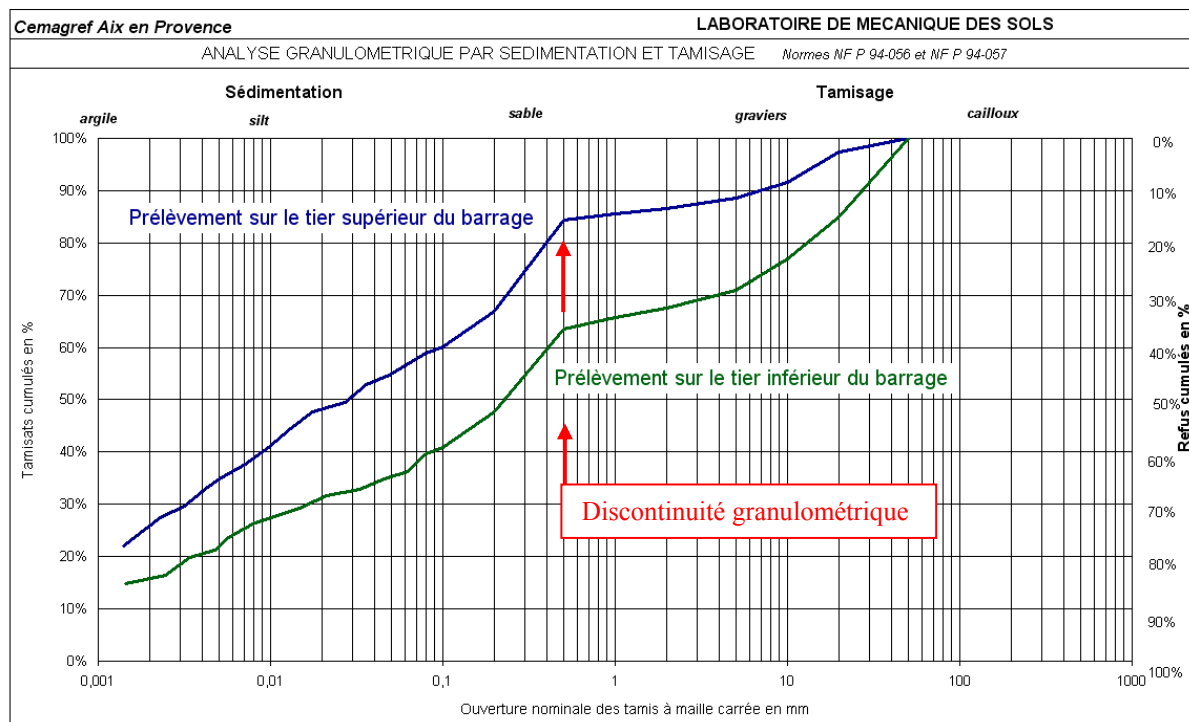


Figure II.19 : Courbes granulométriques des matériaux représentatifs de la constitution du parement aval du barrage de Monjoux, dans la zone du futur évacuateur.

2. Excavation et description des systèmes racinaires

2.1. Protocole sur le terrain

2.1.1. Identification des arbres

Les informations caractérisant les arbres sélectionnés ont été relevées avant de procéder à leur abattage et arrachage. Il s'agit de la situation (PK – profil kilométrique), de l'espèce végétale, du diamètre à 1,30 m de hauteur et au collet, de la hauteur et du type (rejet ou franc pied ; car dans le cas des rejets, la dimension de la souche est souvent plus importante que ce que ne le laisse supposer le diamètre du tronc). Les arbres ont été abattus à 1 m du collet afin de laisser une prise à la pelle mécanique pour extraire les souches. Ultérieurement, une rondelle de tronc a été prélevée afin de pouvoir lire l'âge des arbres. Cette rondelle, prélevée le plus près possible du collet, permet d'estimer l'âge de la souche pour les francs pieds. L'évaluation de l'âge précis de la souche, dans le cas des rejets, est impossible, le comptage des cernes du rejet ne permettant de définir qu'un âge minimum qui sous-estime parfois fortement l'âge réel de la souche.

Un point GPS a été relevé au droit de chaque arbre afin de pouvoir restituer les zones d'arrachage sur la digue et les cartes. Le numéro de l'arbre et son orientation par rapport au haut de la digue sont marqués et repérés à la bombe afin de retrouver l'orientation de l'arbre après excavation, lors de la description.

2.1.2. Extraction des systèmes racinaires

Le protocole d'excavation le moins destructif consiste à déblayer en surface le réseau racinaire superficiel, en positionnant le godet de la pelle parallèlement aux racines principales. L'engin doit donc se déplacer plusieurs fois autour de la souche afin de dégager le système racinaire de surface. Ensuite, il procède au dégagement des racines en profondeur en creusant, tout d'abord depuis l'extrémité des racines, puis en se rapprochant progressivement de la souche. Des « chocs » et appuis contrôlés, appliqués par le godet sur le tronc, permettent de désolidariser l'ensemble du système racinaire du substrat. Enfin, des élingues sont mises en place afin de soulever et extraire la souche (Photo II.7).

Cette technique d'excavation, relativement rapide, induit inévitablement la rupture de nombreuses racines. Un marquage des racines principales cassées a été effectué à la bombe, afin de pouvoir les reconstituer lors des mesures.



Photo II.7 : Elingage d'une souche de pin sylvestre à Castérino

2.1.3. Prélèvement et analyse des matériaux

Les prélèvements de matériaux sont effectués au droit de chaque arbre étudié, dans la fosse d'excavation. Lorsqu'une variation du type de matériaux en fonction de la profondeur a été observée, les différentes couches identifiées ont fait l'objet de prélèvements distincts au cours de l'excavation. Les remblais, étant constitués de sols naturels remaniés, sont rarement stratifiés. Pour les besoins de l'analyse des matériaux, le poids des échantillons de matériaux grossiers devait être compris entre 6 et 8 kg, contre 3 à 4 kg pour les matériaux fins. Les analyses granulométriques (par tamisage humide puis à sec, mailles de tamis de 20 mm à 80 μm - Norme NF P 94-056) puis sédimentométriques (par mesure de la concentration de particules en suspension au densimètre - Norme NF P 94-057) ont été effectuées afin de caractériser les matériaux des différents sites étudiés. Une rupture méthodologique s'observe sur les courbes granulométriques (Figure II.14) au point de transition entre analyse granulométrique et sédimentométrique (à 80 μm). La Norme NF P 94-400-1 indique la classification granulaire des matériaux (Tableau II.9), celle-ci sépare les limons des sables fins au seuil de 63 μm . Nous avons choisis de regrouper les matériaux en deux catégories : les matériaux "grossiers" correspondant aux classes de substrat caillouteux [C] à sablo-graveleux

[SG] (d'après la Norme GTR NFP 11-300), et les matériaux "fins" rassemblant les substrats sableux [S], limoneux [L] et argileux [A] (d'après l'abaque triangulaire de Taylor).

Le dosage de la matière organique a été effectué, par méthode chimique (Norme NF P 94-055) sur certains échantillons afin de comparer la fertilité des matériaux de surface avec celle plus en profondeur.

Ces essais ont été réalisés au laboratoire de Mécanique des sols du Cemagref d'Aix-en-Provence et au laboratoire de la Société du Canal de Provence.

Subdivisions	Taille des particules mm
Gros blocs	> 630
Blocs	> 200 à 630
Cailloux	> 63 à 200
Grave	> 2,0 à 63
Grave grossière	> 20 à 63
Grave moyenne	> 6,3 à 20
Grave fine	> 2,0 à 6,3
Sable	> 0,063 à 2,0
Sable grossier	> 0,63 à 2,0
Sable moyen	> 0,2 à 0,63
Sable fin	> 0,063 à 0,2
Limon	> 0,002 à 0,063
Limon grossier	> 0,02 à 0,063
Limon moyen	> 0,063 à 0,02
Limon fin	> 0,002 à 0,063
Argile	≤ 0,002

Tableau II.9 : Fractions granulaires (Norme NFP 94-400-1)

2.2. Recueil et analyse des données

Au cours de l'excavation, la structure de la souche a été décrite (distribution, direction, orientation, dimensions des racines).

Une technique laser terrestre permettant la numérisation des souches a également été employée sur deux des huit chantiers, avec respectivement deux types de laser différents, afin d'acquérir des données pérennes de haute précision au format numérique (Photo II.8). Le dénombrement de la totalité des racines a pu être effectué sur les souches numérisées et la précision des données a été comparée en fonction des deux types d'appareils utilisés. La combinaison des observations de terrain et des données laser a permis d'identifier les paramètres influençant la structure des enracinements.

(Cf. Section « Matériels et Méthodes » de l'article I : « Tree root systems structure on earth dikes », Troisième partie, Chapitre 1, p.74).

La description de la structure des systèmes racinaires est ensuite complétée par l'acquisition de données quantitatives sur les racines.

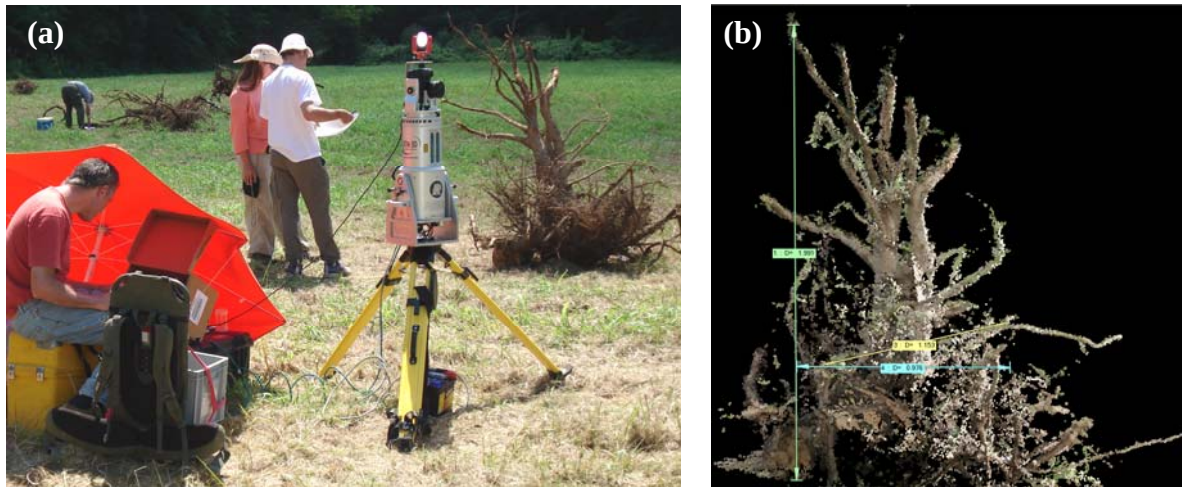


Photo II.8 : (a) Numérisation d'une souche de chêne à Lyon (Laser Riegl) et (b) nuage de points associé

3. Description et mesures des racines

3.1. Protocole de mesure

Afin de caractériser la morphologie et les spécificités de l'architecture des racines, la méthodologie habituellement appliquée pour l'acquisition de données consiste en la prise de mesures manuelles (Photo II.9). Des racines morphologiquement et dimensionnellement représentatives de l'ensemble des racines de chaque souche ont été mesurées (longueur, diamètre, ramification, inclinaison).

(Cf. Section « Matériels et Méthodes » de l'article II : « Tree root typology: a case study on dikes: », Troisième partie, Chapitre 2, p.89).



Photo II.9 : Mesure manuelle des racines sur une souche de robinier à Lyon

3.2. Analyse des données

Une typologie racinaire a été déterminée à partir des caractéristiques morphologiques et dimensionnelles des racines ainsi que des taux de décroissance et de ramification calculés. Nous avons distingué trois types de racines ; les pivots (P), les courtes (C) et les longues (L). La significativité statistique des différents types de racines a été vérifiée.

(Cf. Section « Matériels et Méthodes » de l'article II : «Tree root typology: a case study on dikes», Troisième partie, Chapitre 2, p.89).

4. Etude dendrologique

4.1. Plan d'échantillonnage

Au total, 330 échantillons de racines ont été prélevés sur les souches de feuillus (Chêne, Peuplier, Robinier et Erable negundo) extraites des levées de la Loire et sur les souches de résineux (mélèze et pin sylvestre) implantées sur la digue de Castérino. L'objectif était de caractériser la relation âge/diamètre et la croissance des racines en fonction des trois types racinaires évoqués dans le paragraphe 3.2.

Pour l'étude de la relation âge / diamètre (A/D), les types de racines n'ont pas été pris en compte : nous avons sélectionné les échantillons selon quatre classes de diamètre (2, 5, 8 et 10 cm) et la distance de prélèvement par rapport au collet a été notée. Pour l'étude de la croissance, les racines ont été choisies en fonction de leur type (P, C et L) puis débitées en 4 à 5 morceaux répartis sur toute la longueur de la racine en notant la distance entre chaque prélèvement.

(Cf. Section « Matériels et Méthodes » de l'article III : «Caractérisation de la croissance racinaire d'essences ligneuses implantées sur des digues fluviales», Troisième partie, Chapitre 3, p.111).

4.2. Protocole

Après préparation des échantillons au laboratoire (découpage et ponçage), nous avons procédé à la lecture et au dénombrement des cernes de croissance sur chacun des échantillons de racines.

(Cf. Section « Matériels et Méthodes » de l'article III : «Caractérisation de la croissance racinaire d'essences ligneuses implantées sur des digues fluviales», Troisième partie, Chapitre 3, p.111).

5. Décomposition

5.1. Plan d'échantillonnage

Les expérimentations sur la caractérisation de la décomposition racinaire ont été mises en place sur les digues de l'Isère et de Castérino avec la collaboration de l'AD Isère et d'EDF. Des échantillons de racines de 20 cm de longueur ont été découpés sur des souches vivantes, fraîchement extraites du corps de digue, puis ré-enterrés afin de pouvoir suivre l'évolution de leur dégradation au cours du temps.

5.1.1. Dispositif expérimental sur la digue de l'Isère

Nous avons prélevé, en mai 2008, 10 échantillons de racines par classe de diamètre (2 ; 3 ; 5 ; 8 et 10 cm) et par espèce (peuplier, robinier, frêne, chêne), soit 200 au total (Figure II.20).

- 180 échantillons (36 par espèce) ont été enfouis sur le site dans 32 paniers en inox ;
- 20 échantillons ont été ramenés au laboratoire afin d'évaluer les caractéristiques du bois sain.

Le dispositif principal est constitué de 20 paniers contenant 6 échantillons de même classe de diamètre (Figure II.22), pour chaque espèce (soit 120 échantillons - 30/espèce). Trois dispositifs « tests », formés de 1 panier par espèce contenant 1 échantillon de chaque classe de diamètre (Figure II.23 - soit 60 échantillons tests au total), permettront d'analyser les échantillons en cours de décomposition en laboratoire après chaque campagne de déterrage.

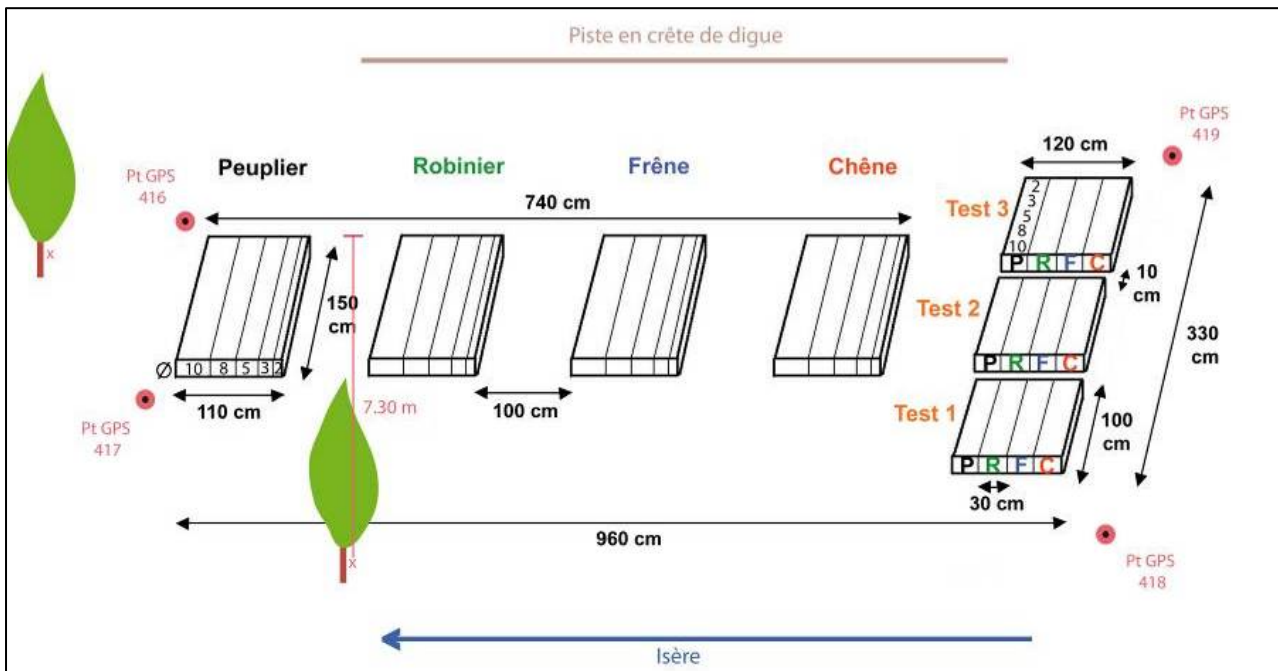


Figure II.20 : Plan du dispositif sur la digue de l'Isère : organisation des paniers et des échantillons

5.1.2. Dispositif expérimental sur la digue de Castérino

Nous avons prélevé, en juin 2009, 7 échantillons de racines par classe de diamètre (2 ; 3 ; 5 ; 8 et 10 cm) et par espèce (mélèze et le pin sylvestre), soit 70 au total (Figure II.21).

- 60 échantillons (30 par espèce) ont été enfouis sur le site dans 12 paniers en inox contenant 1 échantillon de chaque classe de diamètre ;
- 10 échantillons ont été ramenés au laboratoire afin d'évaluer les caractéristiques du bois sain.

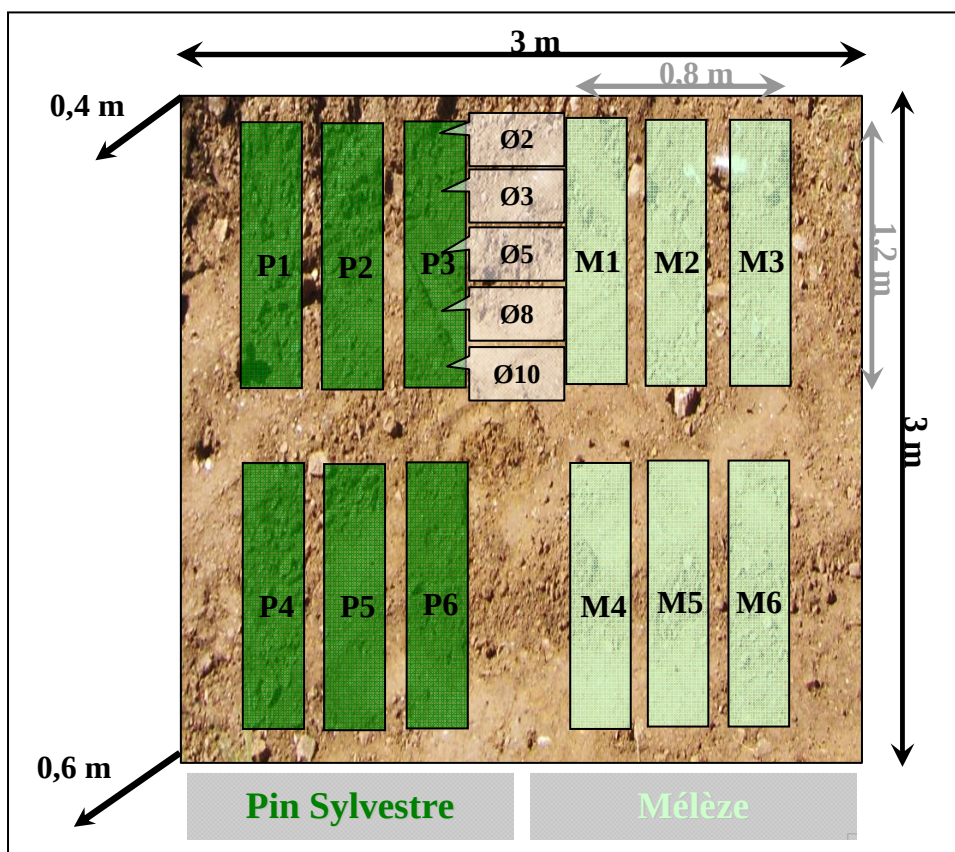


Figure II.21 : Plan du dispositif sur la digue de Castérino : organisation des paniers et des échantillons

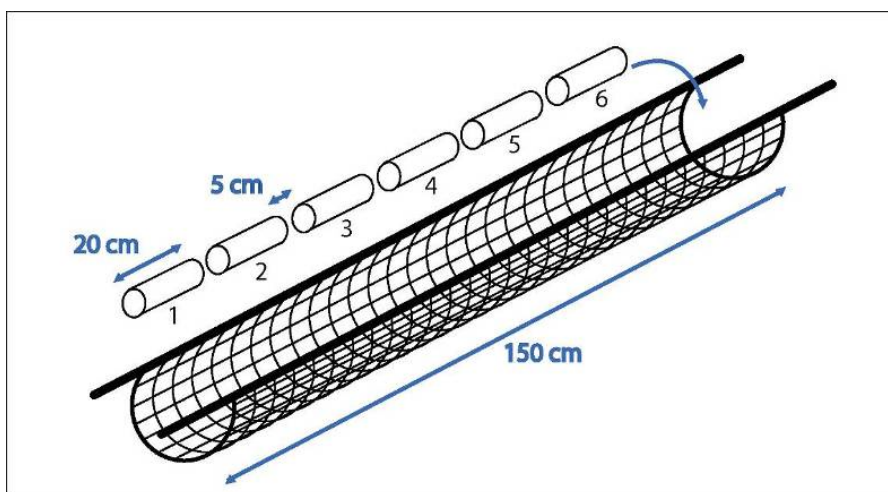


Figure II.22 : Panier type du dispositif principal sur la digue de l'Isère

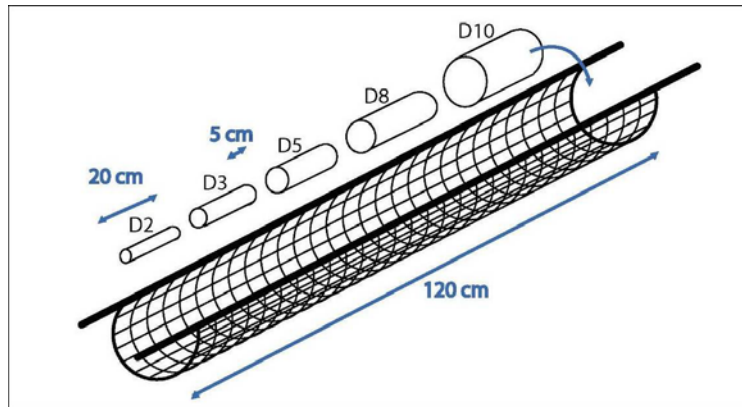


Figure II.23 : Panier test sur la digue de l'Isère et panier type sur la digue de Castérino

5.2. Protocole

5.2.1. Sur le terrain

• Mise en place du dispositif

- abattage des arbres et extraction des souches
- sélection d'échantillons de racines de différents diamètres [2 / 3 / 5 / 8 / 10 cm]
- découpe des échantillons de 20 cm de longueur (Photo II.10 et Photo II.11)
- description des échantillons (épaisseur de l'écorce et du bois de cœur)
- mesures des dimensions (diamètres et longueur) et pesée des échantillons frais (Photo II.12)
- déblaiement à la pelle et talutage à 10% (Photo II.13)
- mise en place des échantillons de racines étiquetés dans des paniers en grillage inoxydable (Photo II.14 et Photo II.14 II.15)
- prélèvement des matériaux pour analyse granulométrique et teneur en matière organique (MO)
- enfouissement du dispositif dans le talus de la digue à 50 cm de profondeur (Photo II.16)
- positionnement du grillage avertisseur et balisage (Photo II.16 II.17)
- remblaiement de la zone et reconstitution du talus de la digue (Photo II.18 et Photo II.19)
- repérage du site par levé topographique



Photo II.10: Découpe des racines

Photo II.11 : Prélèvement et référencement des échantillons





Photo II.12 : Mesure et pesée des échantillons



Photo II.13 : Terrassement de la zone expérimentale



Photo II.14 : Etiquetage des échantillons



Photo II.15 : Mise en place des paniers



Photo II.16 : Enfouissement des échantillons



Photo II.17 : Mise en place du grillage avertisseur



Photo II.18 : Remblaiement de la zone



Photo II.19 : Reconstitution du talus de digue

Les 5 échantillons de bois racinaire sain (T0) pour les 6 espèces étudiées ont été ramenés au laboratoire immédiatement après la phase de terrain.

• *Premier déterrage*

En mai 2010, soit après deux ans de décomposition, nous avons procédé au déterrage du dispositif. Les 180 échantillons ont été nettoyés (afin de les débarrasser des matériaux), et pesés (poids humide). Des informations descriptives sur l'état de décomposition des échantillons ont été notées (présence de champignons, de fissures, écorce déchirée, attaque d'insectes). Une classe de dégradation a été attribuée à chaque échantillon selon son état de dégradation (Tableau II.10). Un test de pénétrométrie au couteau a été réalisé (Tableau II.11). La lame du couteau (lame de 10 cm, type opinel) doit être plantée dans le sens perpendiculaire à l'axe de la racine (Photo II.20).

Classe de dégradation	Description des classes
1	- Écorce intacte - Peu de signes de dégradation (peut-être trous, craquellements) - Racines peu flétries
2	- Ecorce présente à plus 50 % - Quelques morceaux manquants - Petites surfaces dégradées
3	- Moins de 50% de l'écorce est présente - Fissures - Morceaux manquants
4	- Peu d'écorce - Contour déformé par pertes de gros fragments de bois - Aubier manquant
5	- Plus d'écorce - Bois déformé et fibreux - Attaque bois de cœur
6	- Etat sciure - Effondrement de la structure - Impossible à manipuler

Tableau II.10 : Tableau de caractérisation qualitative des racines par classes de dégradation (d'après Lee and Sturgess, 2001, Tobin et al., 2007)

Classe de dégradation	Description des classes
1	Bois dur, lame du couteau pénètre juste de quelques millimètres dans le bois
2	Bois assez dur, la lame du couteau pénètre de 1 à 2 cm dans le bois
3	Bois assez mou, la lame du couteau pénètre facilement dans le bois (la moitié de la lame)
4	Bois mou, la forme du tronc est déformée, la lame entière du couteau pénètre facilement dans le bois

Tableau II.11 : Classification par test de pénétrométrie au couteau (Renvall, 1995)



Photo II.20 : Test de pénétrométrie au couteau sur les échantillons décomposés

Les vingt échantillons test T1 ont été ramenés au laboratoire, tandis que les 160 autres ont été réenfouis.

D'autres échantillons de racine ont été prélevés sur des souches pourries (peuplier, frêne et robinier) abattues en 2005 sur les digues de l'Isère (on les appellera par la suite « Souche 2005 »).

Les analyses effectuées en laboratoire nous ont permis de caractériser les propriétés du bois sain et en décomposition.

5.2.2. Au laboratoire

Les échantillons ont subi diverses manipulations. L'évaluation de leur densité a été évaluée par tomographie rayons X et par déplacement d'eau pour certains, tandis que la caractérisation chimique des échantillons a été effectuée par spectroscopie proche infrarouge (SPIR). Le protocole d'étude de la décomposition des racines a été mis au point au printemps 2010 durant le stage de Master bio-ressources, ingénierie biologique de l'environnement de Sophie Ferrat.

Les échantillons (T0, T1 et Souche 2005) ont été séchés à température ambiante (25-30°C), afin de ne pas les déstructurer (éclatement par rétraction du bois). Leur poids sec a ensuite été mesuré (stabilisation du poids des échantillons après 1 à 2 mois). Ils ont ensuite été conservés en conditions neutres (à température ambiante et faible humidité).

• *Evaluation de la densité par Tomographie rayons X (RX)*

La tomographie RX permet de visualiser en 3D la structure interne du bois, de façon invasive et non destructive et d'étudier les variations spatiales de certaines propriétés (densité, teneur en eau) et caractéristiques du bois (largeurs de cernes, nodosité).

La tomographie RX permet d'obtenir une bonne résolution d'image, pour un faible coût et une bonne rapidité (Longuetaud 2005).

- Choix du partenaire technique

Afin de réaliser ces analyses, une consultation auprès d'entreprises et de laboratoires disposant du scanner à rayons X a été lancée. Les propositions de deux laboratoires de recherche et d'une entreprise ont été comparées. La résolution de l'image obtenue par le scanner (un test de faisabilité a été réalisé au préalable, auprès des entreprises et laboratoires ciblés), la détermination la plus précise possible de la densité des échantillons, la mise en évidence de la porosité, le coût, la rapidité de la manipulation ainsi que la proximité du lieu d'expérimentation ont été pris en compte (Tableau II.12). Après comparaison, nous avons choisi d'utiliser le scanner de l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique), basé à Nancy. Le temps d'acquisition faible, le traitement des images réalisable au Cemagref ainsi que le coût raisonnable et les bons résultats du test de faisabilité en termes de résolution d'image et de calcul de densité ont orienté notre choix. Nous avons travaillé en collaboration avec l'équipe de recherche Qualité des bois au sein du Laboratoire d'études des ressources forêt-bois (LERFOB). La prestation comprend la réalisation des scans et l'archivage des données. Les résultats sont rendus sous forme de séries d'images au format Dicom (.dcm).

	TOMO ADOUR	INRA	BAM
Type de structure	Entreprise	Laboratoire	Laboratoire
Localisation laboratoire/entreprise	TOMO ADOUR S.A. Hélioparc 2, avenue Pierre Angot 64053 PAU	INRA Nancy Route d'Amance 54280 Champenoux	BAM Fed. Inst. for Materials Research and Testing, VIII.3 Unter den Eichen 87 12205 Berlin Germany
Type de technique	Tomographie rayons X (scanner médical)	Tomographie rayons X (scanner médical)	Radiographie rayons X / tomographie RX pour les zones d'intérêt
Résolution de l'image	Très Bonne (allant jusqu'à 0,1 mm)	Bonne (allant jusqu'à 0,625 mm)	Moyenne si radiographie
Obtention de la densité	Oui	Oui	?
Obtention de la porosité	Non détectable si < 0,1 mm	?	?
Rapidité	1 jour d'acquisition Traitement ?	½ jour d'acquisition + Traitement sous imageJ (densité) ou Bil3D (volume)	?
coûts	6300 euros	500 euros	93 euros/heure ou collaboration possible
Résultat test de faisabilité	Bon	Bon	Médiocre

Tableau II.12 : Caractéristiques des différents collaborateurs potentiels (S.Ferrat, 2010).

- Fonctionnement du scanner médical du LERFOB

Le principe de fonctionnement de la tomographie RX est le suivant : les électrons sont émis par une cathode et accélérés en direction d'une anode par une tension électrique dans un tube sous vide. Le ralentissement des électrons sur les atomes de l'anode provoque un rayonnement. L'échantillon est ensuite soumis à un balayage à rayons X. Chaque balayage nous permet d'obtenir une coupe (Figure II.24).

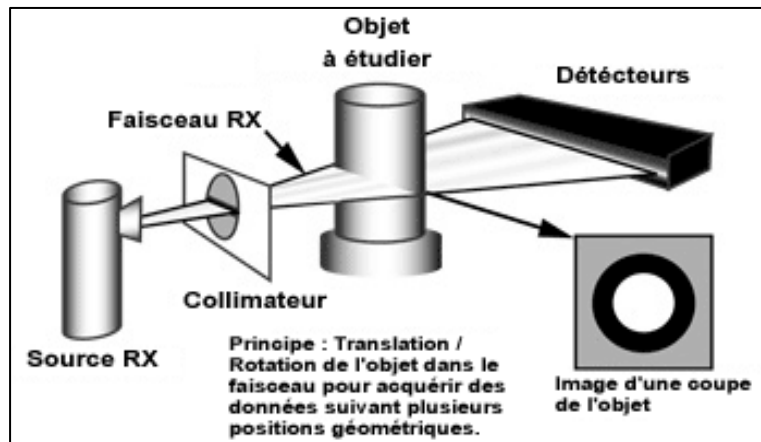


Figure II.24: Principe de fonctionnement du scanner médical (TOMO ADOUR, 2010)

Le scanner médical (Photo II.21) est composé :

- d'un système de mesure : tube émetteur de rayons X, permettant de diriger les rayons X selon un «axe de détection» et un ensemble d'acquisition de mesures, dont les détecteurs recueillent les rayons X résiduels après la traversée de l'échantillon ;
- un système de reconstruction de l'image : les signaux électriques sont convertis en nombres binaires, eux-mêmes transformés en différents niveaux de gris traduisant le degré d'atténuation des rayons X ;
- une console de visualisation de l'image et de récupération des fichiers.



Photo II.21 : Scanner Medical General Electric Brightspeed Exel (INRA).

La table accueillant les échantillons supporte un poids de 205 kg en motorisation. Le temps d'acquisition par coupe varie entre 0,5 et 4 secondes (le temps d'acquisition par coupe peut influencer la résolution de l'image : s'il est trop court, l'image risque d'être bruitée) et l'épaisseur des coupes varie de 0,625 à 10 mm. La largeur de coupe joue sur la résolution spatiale de l'image obtenue.

- Protocole de passage des échantillons au scanner

Chacun des échantillons a été passé au scanner médical à l'état sec sans préparation préalable (Photo II. 22). Une coupe tous les 0,625 mm (meilleure résolution existante avec ce scanner) a été réalisée pour chaque échantillon. Plusieurs réglages du scanner ont été utilisés : 80, 120 kV pour la tension et 50, 80, 200 mA pour l'intensité, ainsi que le filtre de reconstruction « Detail ». Les filtres de reconstruction sont basés sur des algorithmes définis par le monde

médical et influent sur le lissage et la clarté de l'image. Ce filtre est adapté à la vision précise de tous les détails de l'échantillon.

Photo II. 22 : Calage des échantillons avant balayage par le scanner



Une étude a été réalisée par Freyburger et al. (2009) avec ce même scanner et porte sur la relation entre la masse volumique du bois (kg.m^{-3}) et les nombres de Hounsfield (unité de densité utilisée par le scanner), ajustée à partir d'une calibration réalisée sur des échantillons de bois tropicaux ayant des masses volumiques allant de 133 à 1319 kg.m^{-3} donc couvrant un large panel de densités. La validation de la relation se fait sur un jeu de données indépendant, essentiellement des essences tempérées. Les relations ajustées étaient très fortes ($R^2 > 0,9999$) quels que soient les réglages utilisés pour le scanner. En définitive, cette méthode de calibration permet l'obtention de la masse volumique du bois avec une très bonne précision. Ces échantillons de densité connue vont servir à l'élaboration d'une droite d'étalonnage dont on déduit l'équation de calibration pour le calcul de la masse volumique en kg.m^{-3} pour nos échantillons.

Après reconstruction tomographique (simultanée à l'acquisition), on obtient une image volumique de l'échantillon sous la forme de séries d'images transversales de 512 x 512 pixels. Différents logiciels permettent de transformer les données récupérées grâce au scanner, notamment en employant IMAGE J et divers module d'extension développés spécifiquement pour des questions afférentes au matériau bois.

- Traitement des images sous IMAGE J

Le logiciel IMAGE J est un logiciel de visualisation en 2D des images tomographiques. Il nous permet de voir la structure interne de l'échantillon et d'obtenir sa masse volumique. La densité est utilisée comme un indicateur de la qualité du bois car elle est corrélée aux propriétés physiques et mécaniques de celui-ci (Freyburger et al., 2009).

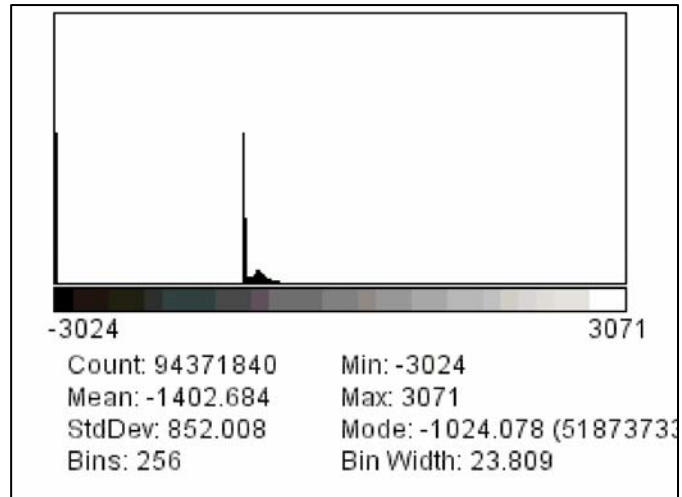
Pour chaque échantillon de 20 cm de longueur, nous avons obtenu une image tous les 0,625 mm, il y a donc environ 300 images par échantillon.

Le traitement des images sous le logiciel IMAGE J s'est déroulé comme suit :

- ouverture de la pile et vérification de la présence d'éléments n'appartenant pas à l'échantillon et devant être retirés lors du traitement de l'image (éléments appartenant à la table de scanner, fentes de séchage) ;
- réglage du contraste et de la clarté de l'image pour une meilleure visibilité ;
- construction d'un histogramme des niveaux de gris sur toute la pile d'images afin de séparer le fond (table de scanner) de l'échantillon (Figure II.25). Le seuil choisi (seuil minimum) doit se situer entre le deuxième pic (à -1000, densité du fond donc densité de l'air en unités Hounsfield) et le troisième pic qui correspond à la densité de notre échantillon (en unités Hounsfield). Le seuil maximum est fixé à 500 unités Hounsfield car le bois d'espèces tempérées n'a pas une densité supérieure. Ce réglage permet donc d'écarter du traitement de l'image toute densité qui n'appartiendrait pas à du bois, mais à un caillou ou un résidu de terre (limon) ;

Figure II.25 : Histogramme des masses volumiques d'une coupe de bois de racine sous IMAGE J

- choix de la zone détournée, c'est-à-dire la zone de calcul de la densité de l'échantillon dont on a enlevé les structures parasites (qui ne sont pas du bois) non éliminées par le seuillage. Pour cela, il faut écarter tous les points qui parasitent l'image (qui n'appartiennent pas à la racine) en choisissant une surface plus grande que celle des points qui seront donc éliminés.



Une fois ces réglages réalisés, on obtient la liste des résultats. Chaque valeur correspond à la densité en unités Hounsfield par coupe, le logiciel réalisant lui-même la moyenne des densités par pixel. Ensuite, on fait la moyenne des densités pondérées par la surface de l'échantillon par coupe pour obtenir la masse volumique globale de l'échantillon.

Cette valeur de densité doit alors être convertie en kg/m^3 à partir des équations de calibrations évoquées précédemment (Figure II.26).

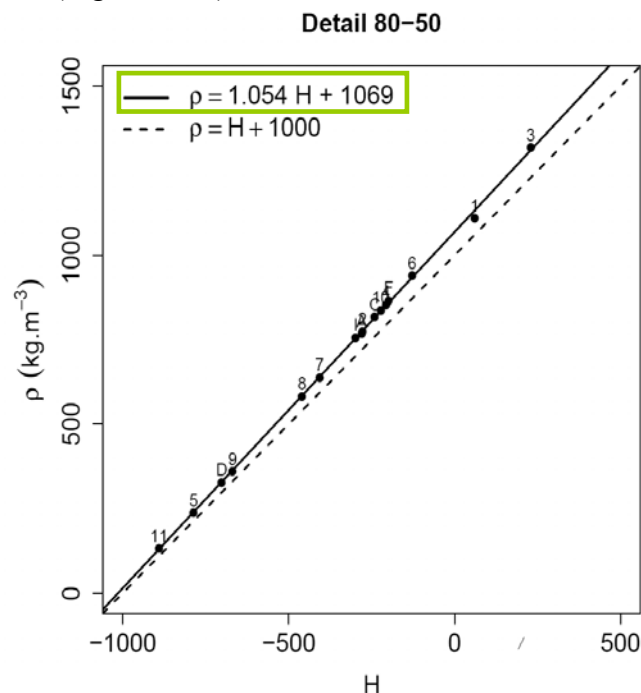


Figure II.26 : Droite de régression linéaire pour le filtre de reconstruction Detail, en encadré vert équation de calibration pour la conversion de la masse volumique des unités Hounsfield (H) en kg/m^3 (Freyburger et al., 2009).

Ces manipulations sous IMAGE J peuvent être réalisées plus rapidement en utilisant une macro applicable à toute la pile d'images d'un échantillon.

- *Evaluation de la densité par déplacement d'eau*

Le calcul de la masse volumique par déplacement d'eau permet d'évaluer la densité des échantillons de bois et de déterminer leur degré de décomposition. Le calcul du poids volumique s'effectue en faisant le rapport entre le poids sec de l'échantillon et le volume brut mesuré par déplacement d'eau (Sandström et al., 2007 ; Tobin et al., 2007). La méthode de détermination du volume par déplacement d'eau permet une mesure du volume rapide et fiable pour des échantillons à forme irrégulière (Chave 2005).

Protocole appliqué :

- pesée à sec de l'échantillon ;
- immersion complète de l'échantillon dans une grande éprouvette posée sur la balance tarée. L'échantillon est maintenu avec une aiguille et ne doit jamais toucher les bords de l'éprouvette (Figure II.27). La mesure est prise après 5 secondes d'immersion. La masse d'eau déplacée mesurée est égale au volume de l'échantillon (puisque l'eau a une densité de 1). Par conséquent, ce qui est lu sur la balance digitale est égal au volume de l'échantillon avec une équivalence $1 \text{ g} = 1 \text{ cm}^3$;
- Ensuite, la densité de l'échantillon est calculée (poids sec de l'échantillon / poids du volume d'eau déplacé)

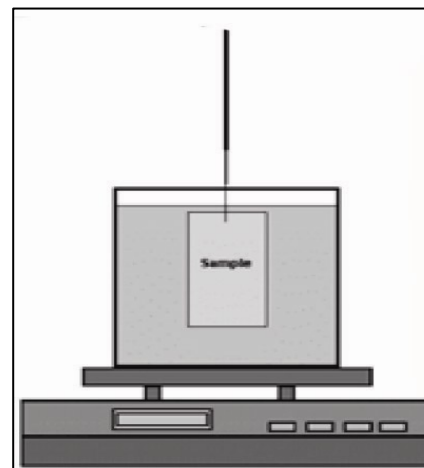


Figure II.27 : Schéma du dispositif de pesée (J.Chave, 2005).

La détermination de la densité par déplacement d'eau a été réalisée sur les paniers tests T1 et T0 de diamètre 2 cm.

Les résultats obtenus par tomographie et déplacement d'eau ont été comparés afin de vérifier l'homogénéité des valeurs obtenues. La densité du bois sain et en décomposition a été étudiée en fonction des espèces végétales et des diamètres.

- *Caractérisation chimique du bois racinaire par SPIR*

L'objectif est de mettre en évidence les différences potentielles de composition chimique entre les espèces, les diamètres et les parties du bois (aubier, duramen, écorce) des racines.

- Principe de la SPIR:

Le Spectromètre PIR utilisé fonctionne selon une méthode de réflexion diffuse, il s'agit d'un spectromètre à transformée de Fourier (modèle Thermo-Nicolet - *Antaris Near-IR analyser*). Ce type de spectromètre comporte sur le banc optique un interféromètre de Michelson (Figure II.28). Le rayon incident se divise en deux parties pour suivre deux chemins optiques différents. Il se crée alors une différence de marche dépendante de la position du miroir mobile. Cette différence de trajet optique entraîne, lorsque les deux faisceaux se recombinent, la formation d'une figure d'interférence. La transformation de Fourier permet d'obtenir le spectre de l'échantillon scanné. Le principal avantage des spectromètres à transformée de Fourier est la précision de la position des longueurs d'ondes (Chalus et al. 2005).

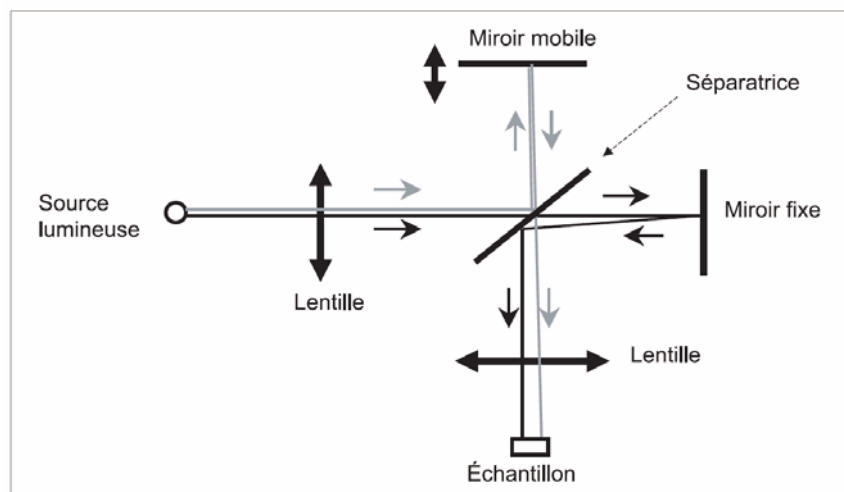


Figure II.28 : Interféromètre de Michelson (Chalus et al., 2005)

- Protocole :

Les échantillons T0 et T1, de 4 espèces végétales et de 4 classes de diamètre (3, 5, 8 et 10 cm), ont été découpés à la scie sauteuse. Une rondelle de 2 cm d'épaisseur a été prélevée au milieu de chaque échantillon (afin d'éviter d'analyser les bords des échantillons qui ont été en contact avec les matériaux et qui sont plus dégradés). La sciure issue de la coupe des échantillons a été récupérée (Photo II.23).

Des mesures ont été prises sur les 32 rondelles au niveau de l'aubier, de l'écorce et du duramen à raison d'une répétabilité de 3 (3 x aubier / 3 x duramen / 3 x écorce). En général, les mesures sont prises en des points différents, à raison de deux mesures sur une face et une sur l'autre face de chaque rondelle, afin d'obtenir une hétérogénéité des spectres. Pour la sciure, on a trois mesures par tas de sciure récupérée lors de la découpe des rondelles.



Photo II.23 : Découpe des échantillons en lamelles de 2 cm d'épaisseur

L'échantillon est posé sur la plaque métallique du SPIR qui recouvre l'obturateur émettant le faisceau infra-rouge. L'obturateur se ferme dans un premier temps pour faire le « background » (c'est-à-dire faire les spectres de l'environnement chimique de l'échantillon afin de les soustraire pour ne pas prendre en compte ces éléments chimiques dans le spectre de l'échantillon) et s'ouvre pour faire le spectre de l'échantillon dans un second temps. Le spectre du « background » met en évidence les pics correspondant à l'eau et au dioxyde de carbone présents dans l'atmosphère – pics qui doivent être déduits du spectre de l'échantillon pour ne pas fausser le résultat.

La rondelle est posée sur la plaque métallique, la zone d'intérêt centrée sur l'obturateur. La sciure est, quant à elle, mise dans une capsule (dont le fond, en verre, est traversé par le faisceau IR) placée sur l'obturateur.

Entre chaque traitement d'échantillon, on nettoie à l'alcool la plaque métallique du SPIR ainsi que la capsule contenant la sciure pour éviter les contaminations.

En raison de l'effet physique dû à la structure de l'échantillon (rugosité, porosité...), le spectre de l'échantillon peut se trouver altéré par ces caractéristiques. C'est pourquoi plusieurs essais ont été réalisés dans le but de passer au SPIR le même échantillon mais sous

différentes formes physiques. Par exemple, une rondelle a été polie afin d'éliminer la rugosité qui, éventuellement, diminuerait la qualité spectrale. Le fait de créer une surface plane qui empêcherait le passage d'un filet d'air entre l'échantillon et l'obturateur pourrait améliorer le spectre. De même, de la sciure a été passée sous différents tamis afin de réduire la granulométrie car il semblerait que plus la granulométrie augmente, plus il y a altération de la qualité spectrale - celle-ci étant de plus très hétérogène. Or, il s'avère que ni le passage au tamis pour la sciure, ni le polissage de la rondelle n'ont amélioré la qualité du spectre.

- Traitement chimiométrique

La chimiométrie est la science de l'utilisation des méthodes mathématiques, statistiques et informatiques qui visent à extraire des informations pertinentes présentes dans des masses de données d'analyses chimiques, inexploitable par des moyens conventionnels.

Un traitement chimiométrique des 384 spectres obtenus a été réalisé par Pierre Van Loot du Laboratoire des Systèmes Complexes de l'Université de St-Jérôme à Marseille. Cette technique permet la différenciation des parties de la racine, des espèces et des états de dégradation T0 et T1. Il s'agit de l'analyse en composantes principales (ACP) basée sur la variance qui est une méthode :

- exploratoire : elle permet de révéler des informations sous-jacentes, d'analyser rapidement les corrélations entre les variables par modélisation de leurs variations systématiques ;
- descriptive : elle caractérise les données sans avoir besoin de connaissance a priori sur le sujet et conduit à une représentation graphique, synthétique et visuelle qui facilite l'analyse des données ;
- factorielle : elle réduit le nombre de variables par construction de nouvelles variables synthétiques et elle organise les données pour qu'elles ne soient plus corrélées entre elles ;
- de classification : les individus, présentant des analogies, se regroupent en catégories homogènes.

Ce traitement statistique permet de visualiser des groupes ayant des caractéristiques communes.

Les racines faisant partie du dispositif expérimental implanté sur la digue de l'Isère, actuellement encore enterrées, devraient faire l'objet de ces mêmes investigations dans approximativement 5 et 10 ans. Cela permettra d'obtenir l'évolution des densités et de la transformation chimique du bois des racines et d'appréhender les vitesses de décomposition en fonction des espèces et des diamètres.

6. Détection électrique

Nous nous étions interrogés, dès le début de nos travaux de recherche, sur les possibilités techniques en matière de détection et de caractérisation non destructives des systèmes racinaires dans le sol. Différentes pistes ont été prospectées, dont celle du radar de sondage souterrain (ou radar géologique), mais n'ont pu être poursuivies du fait de la complexité de mise en œuvre de la plupart des techniques sur le terrain, en conditions réelles et du fait de leur incapacité à fournir des résultats fiables (Annexe 1).

Dans le cadre d'un projet PROCOPE de collaboration et échanges entre France et Allemagne portant sur les méthodes de détection de l'érosion interne dans les ouvrages par résistivité électrique, nous avons pu faire une étude sur les propriétés électriques des racines.

Un premier essai a porté sur des échantillons de racines prélevés sur les digues de l'Isère en mai 2008. Quatre échantillons par espèce (peuplier, robinier, chêne et frêne - soit 16 au total) de diamètre compris entre 2 et 5 cm, ont été envoyés au laboratoire de Géophysique de l'Université de Clausthal afin de caractériser la résistivité* électrique des racines en fonction des espèces. Ces essais n'ont été que peu concluants et représentatifs, les échantillons ayant été découpés en cylindres de 2 cm de diamètre et 4 cm de longueur sans conservation de l'écorce. Mais une différence entre les propriétés du bois des diverses espèces a pu être observée. Le protocole et les résultats des mesures liés à cet essai sont présentés en Annexe 2.

Un second essai a été mis en place au Cemagref d'Aix-en-Provence. L'objectif était ici de tenter de détecter les variations de résistivité électrique liées à la présence d'échantillons de racines de différentes espèces enfouis dans des matériaux représentatifs des digues. Dans ce cas, la structure des échantillons a été conservée (écorce et bois de cœur). Le Cemagref a mis à disposition les locaux et les moyens nécessaires à l'expérimentation tandis que le laboratoire de Géophysique de Clausthal a fourni le matériel de mesures électriques. Les géophysiciens allemands sont venus à Aix-en-Provence afin d'effectuer les essais.

6.1. Plan d'échantillonnage

Des échantillons de racines provenant de six espèces végétales différentes (peuplier, robinier, chêne, frêne, érable et saule) ont été prélevés sur les levées de la Loire en octobre 2008.

Nous avons sélectionné deux classes de diamètre [3-4] et [6-7] cm avec trois répétitions, soit au total, 36 échantillons de 35 cm de longueur. Les échantillons ont été conservés dans des sacs hermétiques au frais afin de conserver leur teneur en eau jusqu'aux essais en laboratoire la semaine suivante.

6.2. Protocole

Les échantillons de racines ont été enterrés dans des conteneurs en plastique remplis de trois types de matériaux représentatifs des digues en terre (limon, sable, grave).

Les différences de conductivité* (inverse de la résistivité) avec et sans la présence des échantillons de racines ont été mesurées et les distinctions entre type de matériaux, espèces et position des échantillons analysées.

(Cf. Section « Material et Methods » de l'article V : «Detection of buried tree root samples by using geoelectrical measurements: a laboratory experiment», Troisième partie, Chapitre 5, p.140).

7. Conclusion partielle

Les différentes méthodes présentées ici ont été sélectionnées ou mises au point afin de répondre aux objectifs scientifique et technique de la thèse. Certaines d'entre elles sont des méthodes reconnues et fréquemment mises en œuvre, telles que les mesures de structure racinaire et d'architecture des racines, les analyses dendrologiques, tomographiques ou spectroscopiques. D'autres méthodes, plus expérimentales, ont dû être mise en place pour apporter des éléments de réponse à des questions très peu étudiées, comme la décomposition ou la détection des racines. Les dispositifs expérimentaux développés dans le cadre de ces deux dernières thématiques comportent des biais méthodologiques liés à la découpe d'échantillons de racines. De ce fait, les résultats obtenus dans le cadre de ces

expérimentations permettent de caractériser les phénomènes étudiés, mais ne sont pas complètement représentatifs des conditions réelles (racines en place, non découpées). Les chapitres suivants présentent les résultats obtenus suite à la mise en œuvre ces différentes méthodes.

RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre 1

Structure des systèmes racinaires

SOMMAIRE

1.1. Présentation de l'article I	73
1.2. Article I : Tree root systems structure on earth dikes	74
1.3. Conclusions de l'article et perspectives.....	85

Statut de l'article I

Soumis le xx/11/10 pour publication dans la revue *River Research and Application* (IF : 1.9).

1.1. Présentation de l'article I

Dans le cadre des travaux de recherche antérieurs ou associés à la présente thèse, de nombreux chantiers exploratoires ont été conduits sur des digues en France en collaboration avec les gestionnaires de ces ouvrages. Ces derniers ont souvent subventionné une partie des travaux. Des études de diagnostic aboutissant à l'élaboration de plan de gestion ou à la formulation de préconisations de gestion de la végétation implantée sur les ouvrages ont été commandées par les gestionnaires tels la CNR et EDF et l'AD Isère aux Groupes de Recherche « Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie » et « Ecosystèmes Méditerranéens et Risques » du Cemagref d'Aix-en-Provence.

Ces chantiers ont nécessité la mise en œuvre de lourds moyens techniques et humains. En effet, de nombreux techniciens de la recherche ou opérateurs spécialisés (mesures manuelles et laser), conducteurs d'engins, bûcherons, stagiaires ont participé à la phase d'acquisition des données sur le terrain.

L'objectif des ces études était d'identifier les paramètres contrôlant la structure des systèmes racinaires d'essences ligneuses et de déterminer les risques qu'ils génèrent en se développant sur les ouvrages hydrauliques en remblai.

D'après les éléments cités dans la synthèse bibliographique dans la première partie de ce manuscrit, l'espèce végétale influence fortement la structure des enracinements, mais le milieu a également un effet important.

La diversité des sites d'étude (constitution, structure et dimension des ouvrages, situation des arbres sur les digues, conditions climatiques) nous a permis de caractériser les variations de la morphologie des systèmes racinaires de plus de dix espèces végétales ligneuses rencontrées sur les ouvrages hydrauliques français.

1.2. Article I : Tree root systems structure on earth dikes

Note : Les mesures sur les souches numérisées non pas toutes été réalisées, elles seront effectuées et analysées avant traduction et soumission de l'article à la revue.

Structure des systèmes racinaires implantés sur des digues en terre Tree root systems structure on earth dikes

Caroline Zanetti^{1a3}, Michel Venetier^{1b4}, Patrice Mériaux^{1a4}, Paul Royet^{1a4},
Simon Dufour², Mireille Provansal³⁴

¹Cemagref, 3275 route de Cézanne - CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5, France

^{1a}Hydraulics and Hydrology Research Unit and ^{1b} Mediterranean ecosystems and associated risks

² Université de Rennes 2 / UMR LETG-COSTEL, Place recteur Le Moal, 35000 Rennes, France

³ Université de Provence, Aix Marseille 1, 29 avenue Robert Schuman, 13100 Aix-en-Provence

⁴ ECCOREV FR 3098, Université Aix-Marseille, France

RESUME

Les digues de protection contre les inondations, implantées à proximité des rivières et des fleuves, ainsi que les digues de canaux, offrent des conditions favorables au développement de la végétation arborée.

Dans le cadre d'études sur l'impact de l'enracinement des ligneux dans les ouvrages hydrauliques en terre, 186 souches d'arbres adultes ont été arrachées et leur système racinaire étudié. Des mesures manuelles et laser ont été effectuées afin d'obtenir une caractérisation détaillée des souches. La structure de l'enracinement dépend de plusieurs paramètres de contrôle tels que le type de végétation (espèce végétale, âge des arbres, mode de gestion), la dimension et la constitution de la digue (structure interne, type de matériaux, teneur en eau, compacité) et l'accès à l'eau (dépendant des positions de la ligne piézométrique, de l'arbre sur la digue et de la zone climatique). La nature des matériaux constitutifs des ouvrages se révèle avoir une grande influence sur la structure des enracinements.

MOTS CLEF : structure racinaire, paramètre de contrôle, matériaux, espèce, digue en terre, laser terrestre.

INTRODUCTION

Les événements hydrologiques ayant affecté les cours d'eau lors de la dernière décennie ont généré de nombreux dégâts suite à des ruptures d'ouvrages hydrauliques. Les gestionnaires de digues et de barrages ont constaté que la présence des arbres sur les talus fragilisait ces remblais en terre (Haselsteiner 2007; Mériaux and Royet 2007; Mériaux et al. 2006).

Le patrimoine des digues en France est particulièrement important : plus de 10 000 km de digues de protection contre les crues, 4 000 km de canaux de navigation et 1 000 km de digues d'aménagements hydroélectriques (Daly et al. 2005; Mériaux et al. 2005). Mais d'autres pays disposent également d'un parc d'ouvrages important ; plus de 10 000 km pour l'Angleterre et le pays de Galles, 20 000 km pour les Pays-Bas et plus de 100 000 km pour les USA, d'après les estimations de l'US Army.

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 et barrages). Les risques encourus sont l'érosion interne et externe liés à l'action mécanique des racines vivantes puis au phénomène de décomposition racinaire (Pinhas 2005; Venetier et al. 2005). Les digues sont généralement construites par déblai/remblai avec les sédiments alluviaux extraits sur place. Leur constitution dépend donc du secteur géographique et des moyens mis en œuvre pendant la réalisation des travaux. Souvent, les digues sont renforcées ; soit par la mise en place, au cœur de l'ouvrage, d'un noyau argileux ou limoneux compacté afin d'améliorer l'étanchéité, et / ou par des revêtements maçonnés, bétonnés ou goudronnés qui assurent la protection des talus contre le courant et les vagues. La croissance des racines exerce des pressions qui peuvent décompacter les matériaux fins (argilo-limoneux), détériorer les propriétés drainantes des matériaux grossiers (sablo-graveleux) voire colmater les drains et dégrader les dispositifs de protection (Zanetti et al. 2008).

Peu d'articles scientifiques ont été publiés sur les caractéristiques structurales et les impacts des systèmes racinaires dans les digues fluviales (Corcoran 2009). En effet la plupart des études sur les systèmes racinaires ont été réalisées en laboratoire sur de jeunes plans, en milieux forestiers et de plantation (Danjon et al. 2008) ou en milieu alluvial, sur des berges naturelles (Abernethy and Rutherford 2000). Les études portant sur les digues ont principalement fait l'objet de rapports techniques de portée nationale (BAW 2005; DVWK 1993; FEMA 2005; TAW 1994). Ces rapports techniques Allemands, Hollandais et Américains ont été réalisés depuis une quinzaine d'années et donnent des préconisations, basées sur le retour d'expérience des gestionnaires, interdisant la présence des arbres sur et à proximité des ouvrages.

De nombreux auteurs se sont attachés à caractériser la structure des systèmes racinaires d'arbres implantés en milieux variés. Les classifications des systèmes racinaires sont généralement basées sur la structure globale des souches et mettent en avant les déterminismes liés à l'espèce végétale (Atger 1991; Atger and Edelin 1994a) et l'adaptation des systèmes au milieu (Fitter and Stickland 1991; Foussadier 2003).

Les systèmes racinaires sont parfois classés en deux groupes. Soit en fonction de la profondeur d'enracinement : les systèmes superficiels (0-60 cm) et profonds (60 à 400 cm) (Lucot and Bruckert 1992). Soit en fonction de leurs caractéristiques topologiques : les systèmes « dichotomiques » et « en arrête de poisson » (Fitter 2002). Plus souvent, les systèmes racinaires sont différenciés en fonction de leur morphologie et du type de racines prédominant. Les trois groupes les plus couramment décrits sont les systèmes en cœur (ou fasciculés), les systèmes « en plaque » (ou traçants) et les systèmes pivotants (Köstler et al. 1968). Cette dernière classification est fréquemment utilisée dans la littérature scientifique (Dupuy 2003; Stokes and Mattheck 1996). Des observations à plus grande échelle, basées sur des mesures détaillées de l'architecture des racines, ont démontré l'existence d'une typologie racinaire (pivots, racines courtes et racines longues), basée sur des critères morphologiques et fonctionnels (Zanetti et al. soumis).

Cette étude a été conduite afin d'appréhender l'impact de l'enracinement des arbres dans les digues en remblai. Dans le cadre de ces travaux, consistant à étudier la morphologie et la distribution des systèmes racinaires d'essences ligneuses, près de 200 souches ont été excavées sur les digues de rivières et fleuves français. Les systèmes racinaires ont été caractérisés en quantifiant leur morphologie, leurs dimensions et leurs particularités. Les objectifs de cette étude sont (i) d'identifier les paramètres biologiques (espèce végétale), climatiques et physiques (position de l'arbre sur la digue, nature des matériaux) contrôlant la structure des enrachements (forme, étendue, profondeur, densité racinaire) et (ii) d'évaluer le risque que constituent les différents types de systèmes racinaires pour les ouvrages en fonction de leur position sur l'ouvrage et des conditions de milieu.

MATERIELS ET METHODES

Les sites d'étude

Les sites d'études se localisent essentiellement dans le quart Sud-Est de la France (Figure 1). Le Tableau 1 rassemble les caractéristiques des différents sites d'étude.

Caractéristiques des sites d'étude	Montélimar	Lyon, Roussillon, St Vallier	Grenoble (nord et est)	Cosne-sur-Loire	Pertuis	Castérino
Cours d'eau	Rhône	Rhône	Isère	Loire	Durance	Bieugne
Altitude (m)	85	200	250	150	200	1 500
Pluviométrie (mm/an)	700	800	900	900	700	1 200
Type de digue	Canal	Canal	Protection de crue	Protection de crue	Protection de crue	Fermeture de barrage
Charge hydraulique	Permanente	Permanente	Temporaire	Temporaire	Temporaire	Temporaire
Dimensions de la digue (H - L en m)	10 - 100	10 - 80 à 100	5 - 20	7 - 30	4 - 15	3 -10
Matériaux constitutifs	SG	SG	LSG	S	LG	SG

H : Hauteur, L : Largeur / G : Graveleux, S : Sableux, L : Limoneux

Tableau 1 : Caractéristiques des sites d'étude

Les différences de conception, de réalisation et de dimensions et de matériaux constitutifs sont souvent marquées entre les digues de canaux (récentes - les aménagements hydroélectriques du Rhône ayant été construits à partir des années 1950) et celles de protection contre les inondations (anciennes). Tandis que les dimensions des digues à charge hydraulique permanente sont importantes (emprise au sol d'une centaine de mètres, largeur en crête et hauteur de 10 m, pente de 50%), les digues de protection contre les crues ont des dimensions 2 à 3 fois plus réduites (Figure 2) avec des pentes comprises entre 20 et 30%. Dans le cas des digues du Rhône et de Castérino, les matériaux constituant les remblais, sur nos secteurs d'étude, sont sablo-graveleux à sablo-caillouteux, avec parfois la présence d'un noyau limoneux compacté. Les digues de la Loire sont essentiellement sableuses. Les digues de l'Isère et de la Durance sont limono-sableuse avec des passées à galets par endroits (Tableau 2).

Au total, 99 systèmes racinaires ont été analysés en détails, sur les 186 extraits. Les arbres ont été sélectionnés en fonction de leur taille (âges variés) et de leur position sur la digue (en pied, milieu ou sommet de talus). Les mêmes espèces ont été observées sur différents types de matériaux. Neuf espèces, fréquemment rencontrées sur ces ouvrages, ont été observées ; chênes (*Quercus ilex* L. et *pubescens* Willd.) érables (*Acer campestre* L. et *negundo* L.), frêne (*Fraxinus excelsior* L.), peuplier (*Populus nigra* L. et hybride), robinier (*Robinia pseudo-acacia* L.), saule (*Salix alba* L.), aulne (*Alnus glutinosa* L.) sur les sites en plaine et mélèze (*Larix decidua* Mill.) et pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) en montagne.

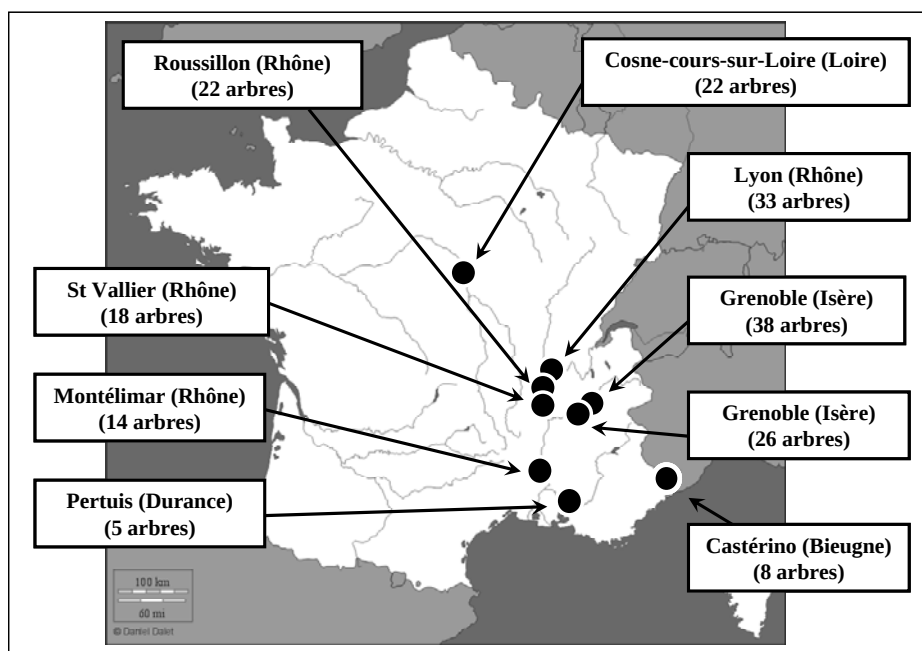


Figure 1 : Localisation des sites d'étude et nombres d'arbres étudiés

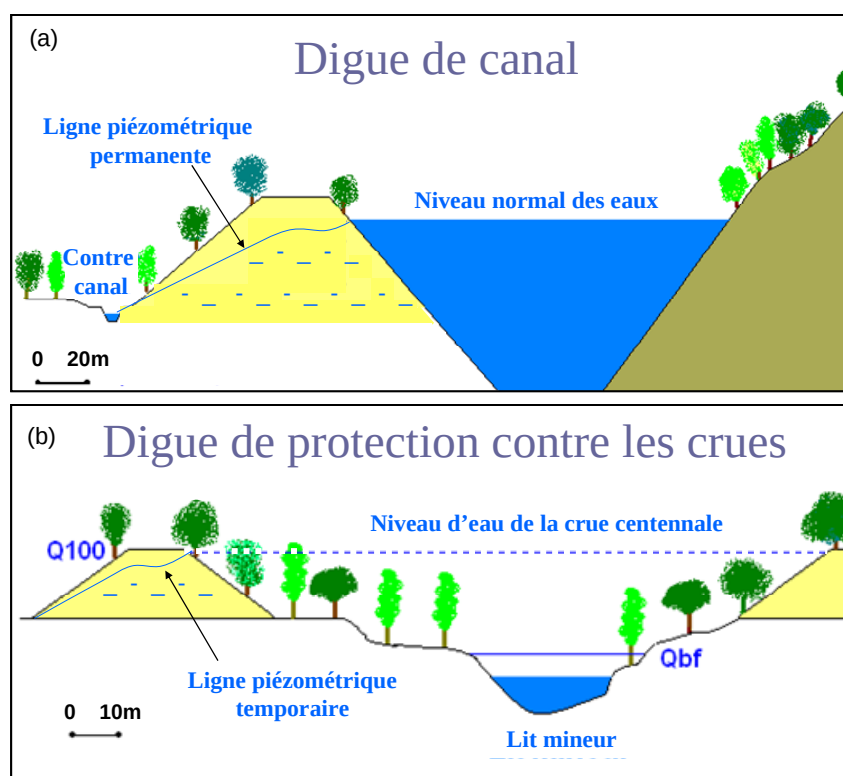


Figure 2 : Les deux types de digues, (a) à charge hydraulique permanente, (b) à charge hydraulique temporaire.

L'extraction des systèmes racinaires

Dans un premier temps, in situ, les arbres sélectionnés sont abattus (coupe à 1m du collet). Les caractéristiques des arbres sont relevées au préalable (numéro de l'arbre, diamètre au collet, hauteur, type - rejet ou franc-pied, position sur la digue - sommet, pied ou milieu de talus, orientation par rapport à la pente). L'excavation des systèmes racinaires se fait en deux étapes : le dégagement des racines superficielles, du collet vers la périphérie, puis celui des racines profondes par creusement.

Certaines longues racines sont suivies sur toute leur longueur à partir du point d'embranchement au collet, puis sont coupées à la base et mises de côté pour les mesures. Une fois la souche désolidarisée des matériaux du sol, elle est extraite par traction ou élingage. Cette méthode d'excavation est assez rapide et pratique mais génère des pertes d'informations liées à la casse de certaines racines.

Parallèlement, des prélèvements de matériaux sont effectués dans la fosse d'excavation au droit de chaque arbre et pour chaque couche différente rencontrée. Les analyses granulométriques (par tamisage humide et à sec, mailles de tamis de 20 mm à 80 μm - Norme NF P 94-056) puis sédimentométriques (par mesure de la concentration de particules en suspension au densimètre - Norme NF P 94-057) ont été effectuées afin de caractériser les matériaux des différents sites étudiés. Nous les avons regroupés en deux catégories : les matériaux "grossiers" correspondant aux classes de substrat caillouteux [C] à sablo-graveleux [SG] (d'après la Norme GTR NFP 11-300), et les matériaux "fins" rassemblant les substrats sableux [S], limoneux [L] et argileux [A] (d'après l'abaque triangulaire de Taylor - Tableau 2). Le dosage de la matière organique a été réalisé au préalable sur les échantillons de matériaux par méthode chimique (Norme NF P 94-055).

N° DES SONDAGES	C3	R1	F1	P8	R5	M6
SITE	Montélimar Rhône	Lyon Rhône	Grenoble Isère	Grenoble Isère	Cosne Loire	Castérino Bieugne
NATURE de L'ECHANTILLON	GS	CG	GS	LS	S	GS
GRANULOMETRIE / SEDIMENTOMETRIE						
CAILLOUX >20 mm en %	27	50	23	0	0	40
GRAVIERS > 5 mm en %	35	34	29	1	2	26
SABLES > 50 μm en %	29	12	27	46	79	25
SILTS > 2 μm en %	5	3	9	47	11	5
ARGILES < 2 μm en %	4	1	2	6	8	4
MATIERES ORGANIQUES	2,61%	1,52%	1,57%	1,13%	1,80%	2,70%

Tableau 2: Nature, texture et teneur en matières organiques des échantillons de matériaux représentatifs de chaque site d'étude (GS : Grave-Sableuse ; S : Sable ; LS : Limon-sableux)

L'acquisition des données

Au cours de l'excavation, la structure de la souche est décrite (distribution, direction, orientation et dimensions des racines), photographiée et schématisée. Ensuite, une fois les souches mises en dépôt, la description de la structure des systèmes racinaires est complétée par l'acquisition de données quantitatives sur les racines (diamètres, longueurs, ramifications).

Sur les 99 souches étudiées, 26 ont été numérisées. A cette fin, deux lasers terrestres ayant des caractéristiques différentes ont été utilisés sur 2 sites distincts (Tableau 3).

Laser	Site	Nombre de souches	Résolution	Précision	Champ de vision	Taille fichier avant filtrage
RIEGL LMS-Z390	Rhône Lyon	17	4 mm	6 mm	0 à 80 °	6 millions de points (2 M / scan)
Leica HDS6000	Isère Grenoble	9	1 mm	2 mm	-65 à 90°	40 millions de points (10 M / scan)

Tableau 3 : Caractéristiques des deux lasers terrestres utilisés

Cette technique repose sur l'acquisition de nuages de points denses par scannage semi-automatique. Le principal apport de cette méthode est qu'elle permet la représentation des souches en 3 dimensions (3D), et constitue ainsi une base de données conservable sur l'architecture des systèmes racinaires. Elle permet également d'effectuer certains types de calculs à partir des objets numérisés (volume) et des vérifications (diamètre, longueur, orientation). Après le traitement des données (assemblage, filtrage), le logiciel IMView permet la visualisation et l'exportation des données 3D, ainsi que la mesure de distances, d'angles et de rayons et la réalisation de coupe au sein des nuages de points. Le dénombrement de la totalité des racines de chaque souche numérisée a été effectué à partir des nuages de points. La qualité des données en fonction des propriétés des lasers a pu être comparée.

Nous avons distingué quatre types de structures racinaires : (i) les systèmes racinaires traçants, composés de racines parallèles à la surface du sol, réparties entre 0 et 70 cm de profondeur, (ii) les systèmes pivotants, comportant un pivot de grande dimension par rapport à la taille de la souche pouvant s'ancrer à plus de 2 m de profondeur, (iii) les systèmes mixtes composés d'un système traçant bien développé et d'un ou deux petits pivots, atteignant rarement 1,50 m de profondeur et (iv) les systèmes racinaires fasciculés (ou en cœur) constitués d'un grand nombre de racines souvent obliques, généralement réparties entre 0 et 1,50 m de profondeur (Figure 3) .

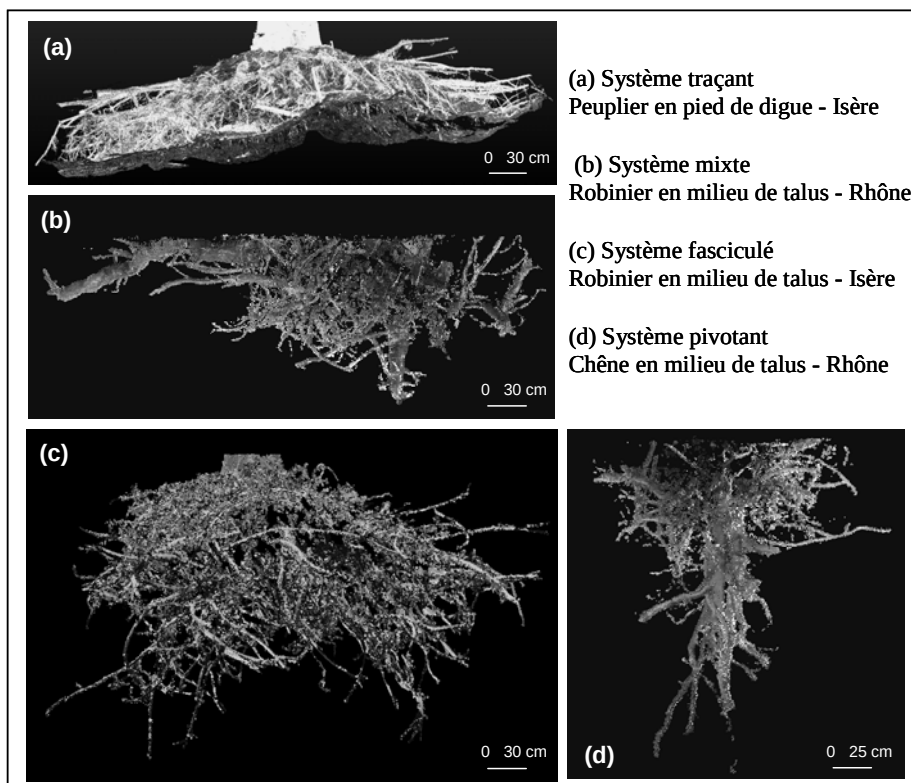


Figure 3 : Les quatre types de structure racinaire

Dans le cadre de cette étude nous avons associé les classifications basées sur la morphologie des systèmes racinaires et sur la profondeur des enracinements, ce qui permet d'obtenir une description simplifiée plus précise des systèmes racinaires observés.

RESULTATS

Le Tableau 4 présente une classification des 99 systèmes racinaires étudiés en fonction de leur type de structure, de l'espèce végétale et du type de matériaux.

On constate qu'il n'y a pas de structure d'enracinement spécifique aux espèces végétales. La plupart des espèces étudiées présentent au moins 2 des 4 types de structures racinaires définies. Les matériaux semblent avoir une influence plus importante. Tandis que les systèmes fasciculés ont été rencontrés uniquement sur matériaux fins, les systèmes mixtes se développent essentiellement sur matériaux grossiers (Figure 4). Les systèmes traçants s'observent sur matériaux fins et grossiers. Seulement 2 systèmes pivotants ont été observés en matériaux grossiers sur 47 souches extraites dans ce type de matériaux (Tableau 4). Les conifères ont été étudiés sur un seul site et dans un seul type de matériaux, ce qui ne permet pas d'effectuer de comparaison.

Dans les matériaux fins (sableux à limoneux), la densité de racines par souches est élevée et leur morphologie est régulière avec des diamètres limités (Figure 5 - a et Tableau 5). Tandis qu'au niveau des zones plus graveleuses, la densité de racines est plus faible, les diamètres plus importants et la morphologie des racines complexe, marquée par les déformations liées à la présence des galets (Figure 5 - b et Tableau 5).

	Traçant	Mixte	Pivotant	Fasciculé	Total
Robinier	4 / -	6 / -	-	- / 8	18
Peuplier	- / 1	4 / -	1 / -	- / 9	15
Chêne	1 / -	10 / -	1 / -	- / 8	20
Frêne	1 / 7	4 / -	-	- / 5	17
Erable	2 / 2	-	-	- / 4	8
Saule	- / 1	- / 3	-	- / 1	5
Aulne	- / 3	3 / -	-	-	6
Pin sylvestre	-	3 / -	-	-	3
Mélèze	-	7 / -	-	-	7
<i>Total</i>	22	40	2	35	99

Nombre de systèmes racinaires sur matériaux : **grossiers (47) / fins (52)**

Tableau 4 : Structure des systèmes racinaires en fonction des espèces végétales et du type de matériaux

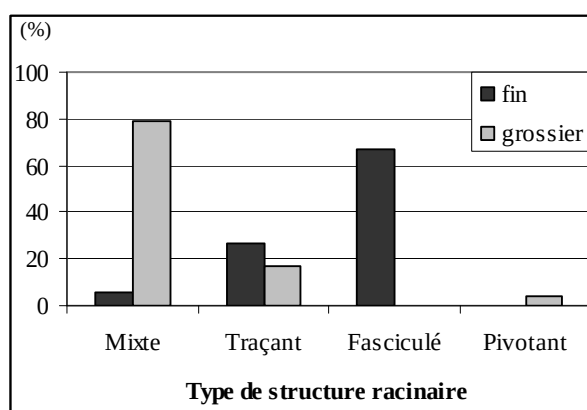


Figure 4 : Pourcentage des types de structure racinaire en fonction des matériaux, toutes espèces confondues

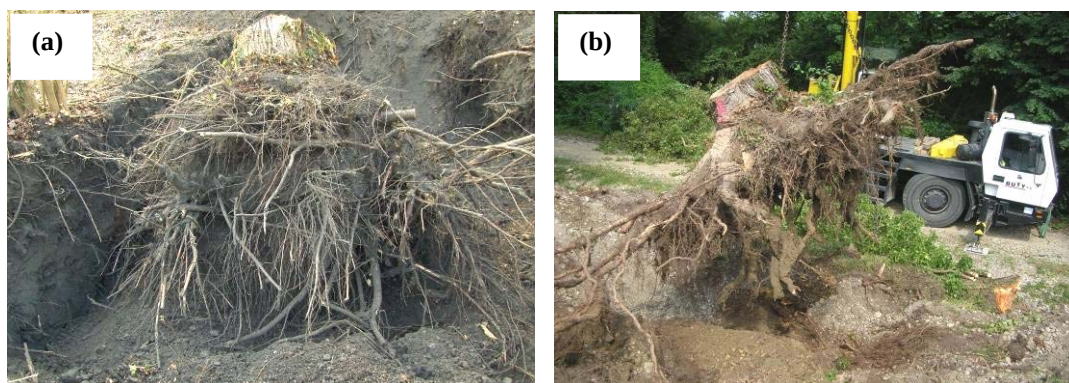


Figure 5: Souches de peuplier, (a) sur matériaux fins à Grenoble, (b) sur matériaux grossiers à Lyon

Le tableau 5 présente les caractéristiques détaillées de systèmes racinaires ayant été numérisés. Le diamètre moyen et le nombre de départ de racines de diamètre supérieur à 2 cm ont été évalués pour chaque souche à partir des données laser. Afin de dénombrer les racines, les systèmes racinaires, vus en plan, ont été découpés en 8 secteurs de 45° d'angle à partir du cœur de la souche. Un repère placé sur la souche indique le haut du talus. Les quatre premiers secteurs constituent la zone située en direction du sommet de talus de la digue, les quatre autres sont orientés vers le bas du talus. Le secteur particulier « v » correspond aux racines verticales (pivots).

Site	Espèce	Type	Diamètre au collet (cm)	Matériaux	Structure racinaire	Volume d'encomb- ment (m ³)	Diamètre moyen des racines (cm)	Nombre de racines par secteur, en direction du haut, du bas de pente et verticales										Nombre de racines total par souche	Nombre moyen de racines
								Haut				Bas				v			
L	R	R	21	G	Mixte	8,6	5 - 7	6	8	7	5	5	6	6	10	2	55	sur matériaux grossiers	
L	R	R	24	G	Traçant	4,7	4 - 6	4	2	7	10	7	8	10	5	0	53		
L	R	R	22	G	Mixte	8,3	4 - 6	5	9	7	4	5	6	3	8	3	50		
L	F	R	26	G	Traçant	5,4	4 - 6	6	6	4	7	5	4	8	7	0	47		
L	C	FP	20	G	Pivotant	3	5 - 7	4	3	3	3	2	4	4	3	10	36	49 e = 7,4	
L	P	R	44	G	Pivotant	21,8	10 - 12	4	8	1	4	5	2	4	1	15	44		
G	R	R	32	G	Mixte	6,8	5 - 7	1	3	4	2	15	12	10	9	2	58		
G	F	R	50	F	Traçant	6	3 - 5	5	7	11	9	8	10	20	16	0	86		
G	F	R	70	F	Fasciculé	14,4	2 - 4	20	25	40	20	30	50	50	60	0	295	sur matériaux fins	
G	F	FP	64	F	Traçant	8,6	3 - 5	10	5	10	5	10	20	25	20	0	105		
G	P	R	81	F	Fasciculé	12,3	2 - 4	40	45	40	30	45	40	45	35	0	320		
G	R	FP	70	F	Fasciculé	8,25	2 - 4	30	25	30	25	20	60	60	35	0	285		
						Moyenne et écart-type sur haut et bas de pente		11,9 e = 12,0				17,4 e = 17,54							
Site = L : Lyon (laser Riegl), G : Grenoble (laser Leica) / Espèce = R : Robinier, P : Peuplier, C : Chêne, F : Frêne / Type = R : rejet, FP: Franc-pied / Matériaux = G : Grossiers, F : Fins / Secteurs en gris = haut de pente																			

Site = L : Lyon (laser Riegl), G : Grenoble (laser Leica) / Espèce = R : Robinier, P : Peuplier, C : Chêne, F : Frêne / Type = R : rejet, FP: Franc-pied / Matériaux = G : Grossiers, F : Fins / Secteurs en gris = haut de pente

Tableau 5 : Caractéristiques de 12 systèmes racinaires numérisés

Les systèmes fasciculés ont un nombre total de racines statistiquement plus élevé (en moyenne quatre fois) que les autres types de structures racinaires ($P = 0,02$). Tous types de structure racinaire confondus, les souches comportent moins de racines dans les matériaux grossiers que dans les matériaux fins ($P = 0,002$) et les racines sont significativement plus grosses dans les matériaux grossiers ($P = 0,006$). Le volume d'encombrement des souches n'est pas corrélé au diamètre au collet ni à l'âge du tronc ($R^2 = 0,2$). Sur les digues, les arbres sont souvent coupés et il est difficile de connaître l'âge réel des souches. Les volumes des souches de rejets sont généralement plus importants que ceux des arbres de franc pied bien que la différence ne soit pas statistiquement significative ($P = 0,8$). De même pour les systèmes à structure traçante qui ont un volume d'encombrement plus réduit que celui des souches mixtes ou fasciculées ($P = 0,13$).

Les résultats ci-dessus, issus d'un faible nombre d'échantillons de souches numérisées, sont bien sûr à considérer comme des tendances qui méritent d'être confirmées par les autres mesures laser (14 souches numérisées à traiter).

Si les matériaux semblent avoir un rôle déterminant sur la structure des enracinements, d'autres paramètres modifient ponctuellement la morphologie des souches et des racines.

Accès aux ressources

Nous avons souvent observé une concentration plus importante des racines vers le bas des pentes (Tableau 5), cette tendance se vérifie en moyenne sur les systèmes numérisés, bien que la différence entre le nombre de racines en direction du haut et du bas de pente ne soit pas statistiquement significatif ($P = 0,08$). La structure de certaines souches paraît influencée par la proximité de l'eau.

Chez certains robiniers ou peupliers, la majeure partie des racines traçantes s'est développée en direction de l'accès à l'eau le plus proche (rivière ou canal), ayant pour conséquence une dissymétrie de la souche.

Sur matériaux grossiers (drainants), les systèmes racinaires sont traçants (à 95%) en sommet de digue et sont mixtes ou pivotants en milieu de talus et en pied de digue si l'accès à l'eau est possible en profondeur.

A plus grande échelle, on observe la modification de la morphologie des racines afin de pouvoir capter la ressource en eau ou en nutriments (zones de concentration en matière organique en décomposition). Il s'agit d'une division des racines de structure (ligneuse) en une grande quantité de racines fines, portant elle-même des milliers de radicelles (Figure 6).



Figure 6 : Division des racines ligneuses en milliers de radicelles et poils absorbants au niveau de la nappe (*Alnus glutinosa*)

Les contraintes locales

La position des nappes d'eau (rivière ou contre-canal) est une contrainte vis-à-vis de l'enracinement des arbres, en limitant leur possibilité de développement en profondeur dans les horizons saturés sur de longues périodes. C'est parfois le cas, en pied de digue, sur matériaux fins : les systèmes conservent une structure traçante superficielle car ils ne peuvent émettre des racines en profondeur, sous le niveau de l'eau (Figure 3-a).

Les racines sont également limitées en profondeur par les noyaux argileux ou limoneux compactés naturellement ou mécaniquement qu'elles ne parviennent pas à pénétrer (Unger and Kaspar 1994). Par contre, il est fréquent d'observer une concentration de racines au niveau d'une « faille » de compactage (passée sableuse ou défaut de compactage). Nous avons observé des pivots s'étant développés au droit de défauts de compactage, sur les digues du Rhône, et ayant adopté une morphologie géométrique en « croix » (40 cm de largeur sur 2 m de profondeur, et seulement 10 cm d'épaisseur) en suivant les zones de moindre résistance. Ces pivots ont d'ailleurs permis aux arbres de résister à la tempête de 1999, tous ceux qui étaient tombés avaient un système racinaire traçant.

D'autres obstacles, comme des murs, perrés, blocs et enrochements présentent des contraintes physiques qui induisent des modifications locales de la structure des systèmes racinaires. La présence d'un perré (structure rigide de protection du talus de la digue) peut empêcher le développement symétrique de la souche ou son ancrage en profondeur (systèmes traçants très superficiels à moins de 20 cm de profondeur) néfaste à leur stabilité. Certaines racines se développent dans les fissures ou les limites de plaques (joints), elles forment des petits pivots à morphologie irrégulière. En croissant, elles peuvent détériorer les joints puis soulever les pierres ou dalles, déstructurant ainsi définitivement le perré.

Au contraire, dans le cas des enrochements ou des blocs de protection du pied de digue contre les courants érosifs, les systèmes racinaires contournent ou englobent ces obstacles, ceci renforçant leur ancrage et leur stabilité. Dans ces cas, il est difficile d'attribuer une structure racinaire type à ces souches à la morphologie opportuniste très irrégulière. Le vent influence également la structure des souches. Dans la vallée du Rhône, les arbres sont exposés à des vents violents et fréquents soufflant surtout du nord (mistral - plus de 50 km/h 120 jours par an). Sur matériaux drainants en sommet de digue, les souches possèdent des pivots tandis que les racines traçantes sont plus grosses du côté exposé au vent, avec une dissymétrie marquée.

DISCUSSION

L'analyse des systèmes racinaires ligneux matures n'est pas une tâche aisée du fait de la complexité de ces objets. L'étude d'un grand nombre de systèmes racinaires implantés dans diverses situations a permis de mettre en évidence les paramètres influant sur la structure des enrachements (Figure 7).

La structure des systèmes racinaires résulte d'un compromis entre héritage génétique et interaction avec le milieu (Atger 1991; Atger and Edelin 1994b). Les observations réalisées au cours des travaux effectués sur les digues ont mis en évidence que la morphologie des systèmes racinaires est en effet influencée par l'espèce végétale, l'âge des arbres, le milieu (nature et structure des matériaux) et le contexte (position de l'arbre sur la digue, contraintes locales). Cependant, certains paramètres, tels que les matériaux et l'accès aux ressources en eau, semblent avoir une influence prédominante.

La position de l'arbre sur la digue agit sur deux paramètres qui peuvent influencer la morphologie des systèmes racinaires. Il s'agit de la pente et de l'accès à l'eau. La pente peut générer une dissymétrie du système racinaire. Généralement, sur terrain pentu, un grand nombre de racines se concentrent dans le talus vers le haut de la pente, afin d'assurer l'ancrage de l'arbre (Danjon et al. 2008). Dans le cas des digues, les racines se concentrent en direction de l'eau (contre-canal ou rivière) ou de zones plus fertiles et humides (berges). Il semblerait d'ailleurs qu'il y ait une adaptation de la structure des systèmes racinaires en fonction des besoins de l'arbre ou des opportunités offertes par le milieu, des ressources accessibles. Sur matériaux drainants, les systèmes sont traçants et très superficiels lorsqu'ils sont implantés en haut de digue (captage des eaux de pluie) tandis qu'ils sont mixtes ou pivotants en milieu ou pied de digue (accès à la nappe).

Les sols ou matériaux compactés présentent des propriétés mécaniques défavorables au développement des racines dans leur jeune âge (Unger and Kaspar 1994) de la même façon que la couche d'altération limite la profondeur de sol prospectable par les racines (Danjon and Fourcaud 2009). Ce point est important sur les digues récentes munies d'un noyau étanche compacté, où les arbres ne représenteraient pas un danger important en termes d'érosion interne. Par contre, dans ces conditions, la faible profondeur d'enracinement accroît le risque d'érosion externe par déracinement.

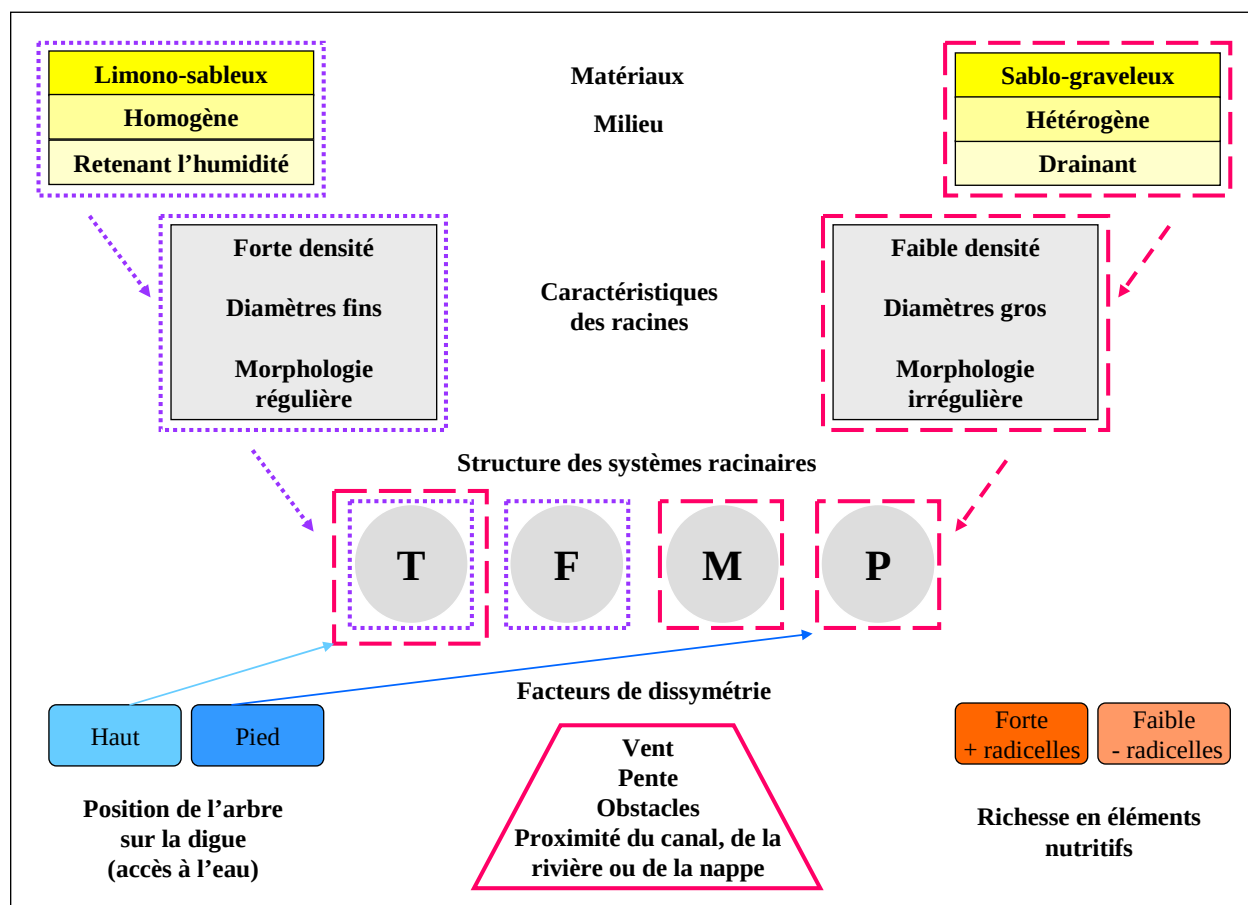


Figure 7 : Modélisation conceptuelle de la structure des systèmes racinaires ligneux
(T : Traçant, F : Fasciculé, M : Mixte, P : Pivotant)

Développement racinaire en fonction de l'espèce

Bien que la structure racinaire des souches ne dépende pas de l'espèce végétale, certaines essences ont des prédispositions en termes d'architecture racinaire, qui rendent leur présence inappropriée sur certaines parties des digues. C'est le cas des robiniers et des peupliers qui développent souvent quelques grosses racines traçantes, aux dimensions disproportionnées par rapport à la celle de la souche (Figure 3 – b). Ces racines sont orientées soit en direction de la rivière ou du canal (pénétrant le remblai), soit parallèlement à la digue (restant ainsi superficielles). Elles peuvent atteindre plus de 10 m de longueur et avoir des diamètres au départ de plus de 20 cm. A la différence du robinier qui ne possède que de petits pivots lorsqu'il est doté d'une structure mixte, le peuplier peut développer de puissantes et profondes racines verticales, de plus de 40 cm de diamètre et jusqu'à 3 m de profondeur. Ces racines de grandes dimensions sont surtout observées dans les matériaux grossiers. On les retrouve mais moins disproportionnées dans les matériaux fins. Les systèmes racinaires de chênes à structure mixte que nous avons observés se caractérisent par une distribution relativement homogène des racines et une extension limitée autour de la souche, par comparaison avec certains robiniers ou peupliers.

Utilité de la numérisation laser

La numérisation des souches offre la possibilité d'obtenir une représentation en 3D de ces systèmes complexes et permet ainsi de constituer une base de données conservable et réutilisable. Cependant, la qualité des données laser dépend des caractéristiques techniques de l'appareil utilisé ainsi que des modalités d'acquisition. Du point de vue des caractéristiques techniques, une résolution élevée (1 mm) permet d'acquérir un nuage de points beaucoup plus dense (10 millions de points par scan) et donc d'obtenir des objets aux contours précis. Une douzaine de scans de cette précision semble pouvoir fournir une base de données correctement exploitable (Gärtner et al. 2009). La réalisation de 3 ou 4 scans par souche est insuffisante pour générer un modèle fermé. Les effets d'ombrage et le bruit sont trop importants. La présence de trous dans les données nuit à la reconstruction d'un modèle fermé qui permettrait de calculer des volumes soit sur des racines sélectionnées soit sur la globalité de la souche. Il n'a donc pas été possible dans le cadre de cette étude d'évaluer les volumes de bois racinaire. Cela nécessiterait un maillage manuel (pour relier les points et fermer le nuage) fastidieux et imprécis.

Les volumes d'encombrement calculés prennent en compte l'ensemble du volume de la souche et des matériaux

attenant, c'est-à-dire la zone impactée par la présence d'un système racinaire dense dans la digue (les racines traçantes et les extrémités cassées allant bien plus loin). Ils sont intéressants car représentatifs du volume de matériaux nécessaire pour la reconstitution du remblai après excavation. Cependant, dans le cas des rejets, il est difficile d'appréhender ce volume d'encombrement, sans extraction de la souche, car la partie aérienne de l'arbre (diamètre au collet, hauteur ou âge) n'a pas de signification par rapport à la dimension de la souche. Ceci conduit souvent les gestionnaires à sous-estimer l'importance de la partie souterraine des arbres développée dans le corps de digue.

Structure racinaire et risques pour les digues

Le développement racinaire dans les digues peut être plus ou moins gênant en fonction de la structure des souches, de la dimension et de la direction des racines, paramètres dépendant des matériaux, de l'accès à l'eau, des contraintes locales mais également de l'espèce végétale.

Les systèmes pivotants matures génèrent un risque pour les ouvrages car ils pénètrent le corps du remblai. Ils assurent un bon ancrage de l'arbre par leurs pivots mais posent le problème de la déstructuration des matériaux. Les pivots de gros diamètre engendrent un risque d'effondrement après leur pourrissement.

Un système traçant est peu résistant au risque d'arrachement (chablis) mais assure 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 si les racines traversent une partie de la digue ou s'enfoncent dans le corps de digue à l'horizontale, ce qui est rarement observé. Par contre les systèmes traçants implantés en pied de digue émettent de longues racines au contact entre la digue et l'ancien sol naturel, cette zone étant peu dense et riche en éléments nutritifs, susceptibles de traverser l'ouvrage au niveau de la fondation de celui-ci, créant un risque de fragilisation. Pour les digues de canaux, les grosses racines traçantes, qu'elles soient en pied de digue côté contre-canal ou en haut de digue côté canal, peuvent générer une déstructuration des ouvrages drainants (parement aval) ou de protection (revêtement rigides - parement amont). Ces racines traçantes sont moins gênantes lorsqu'elles se situent en sommet de digue, car elles sont généralement très superficielles (5 à 30 cm), donc au dessus du niveau maximal des eaux (cote PHE).

Le système racinaire à structure mixte rassemble les avantages et inconvénients des systèmes traçants et pivotants précédemment énoncés.

Les systèmes fasciculés, présentent une bonne résistance à l'arrachement du fait de la répartition dense et homogène des racines, mais présentent des volumes d'encombrement élevés, et peuvent donc provoquer des loupes d'arrachement de grandes dimensions. Ceci peut créer un point bas en crête de digue et induire un risque de surverse lors des crues. Sur le talus, ces hétérogénéités de surface favorisent le développement de courants tourbillonnaires, pouvant engendrer des affouillements en pied de digue et des glissements, conduisant à la rupture de l'ouvrage.

Le risque dépend évidemment de la dimension de l'ouvrage : il est plus élevé sur les digues de petite dimension où la souche occupe une part importante du remblai et constitue ainsi une zone d'hétérogénéité. Sur les digues étroites, comme certaines digues de protection contre les inondations, les racines traçantes peuvent traverser l'ouvrage de part en part et être responsables de la création de conduits favorables au déclenchement de l'érosion interne.

CONCLUSION

L'influence de l'espèce se traduit peu sur la structure des enracinements, les conditions environnementales (matériaux, accès à l'eau, contraintes locales) semblent être déterminantes. Ce sont les dimensions des racines, leur position dans l'ouvrage, leur direction ainsi que leur caractère opportuniste qui rendent leur développement et leur présence dangereux pour les ouvrages hydrauliques. En effet, les racines empruntent les chemins les plus courts pour accéder aux ressources en eau et nutriments et pour cela peuvent exploiter les failles de compactage ou autres défauts de réalisation des ouvrages.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par le Cemagref, la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, et par les gestionnaires d'ouvrages (EDF, CNR, AD Isère, DDT de la Nièvre, SMAVD) qui ont mis à disposition d'importants moyens techniques et matériels pour la réalisation des chantiers d'extraction des systèmes racinaires. Les auteurs tiennent à remercier les collègues et techniciens qui ont aidé à l'acquisition des données pendant les campagnes de terrain, et notamment Willy Martin, Roland Estève, Christian Ripert, Olivier Chandioux et Pierre Jean Moundy.

REFERENCES

- Abernethy B and Rutherford I D (2000) The effect of riparian tree roots on the mass-stability of riverbanks. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 921-937.
- Atger C (1991) L'architecture racinaire est-elle influencée par le milieu? *L'arbre, biologie et développement* 71-84.
- Atger C and Edelin C (1994a) Premières données sur l'architecture comparée des systèmes racinaires et caulinaires.

Canadian Journal of Botany 72: 963-975.

Atger C and Edelin C (1994b) Stratégie d'occupation du milieu souterrain par les systèmes racinaires des arbres. *Ecologie* 49: 343-356.

BAW (2005) Circulaire Allemande : Stabilité des Dignes (Merkblatt standsicherheit von dämmen an bundeswasserstraben). In *Circulaire Stabilité des digues sur les voies d'eau fédérales allemandes*, Ed B f W (BAW). pp 40. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe.

Corcoran M (2009) The Effects of Woody Vegetation on Levee Performance. In *US Society of Dams, USSD Workshop on Levees*, Sacramento, California October. Ed US-ARMY

Daly F, Chapital L and Personne C (2005) État des lieux patrimonial des digues de canaux de navigation en France. *Ingénieries EAT N° spécial*: 23-30.

Danjon F, Barker D H, Drexhage M and Stokes A (2008) Using Three-dimensional Plant Root Architecture in Models of Shallow-slope Stability. *Annals of Botany* 101: 1281-1293. doi:10.1093/aob/mcm199

Danjon F and Fourcaud T (2009) L'arbre et son enracinement. *Innovations Agronomiques* 6: 17-37.

Dupuy L (2003) Modélisation de l'ancrage racinaire des arbres forestiers. In *Ecole doctorale de sciences physiques et de l'ingénieur*. pp 135. Université Bordeaux 1.

DVWK (1993) Recueil des recommandations de gestion et informations législatives allemandes Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau.

FEMA (2005) Technical manual for dam owners - Impacts of plants on earthen dams. pp 115. Federal Emergency Management Agency, Us Department of Homeland Security.

Fitter A (2002) Characteristics and functions of root systems. In *Plant Roots - The hidden half*, Eds Y Waisel and A Eshel. pp 15-32. Dekker, New York.

Fitter A and Stickland T (1991) Architectural analysis of plant root systems 2. Influence of nutrient supply on architecture in contrasting plant species. *New Phytologist* 118: 383-389.

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*, Ed IDF. pp 124-133. Paris.

Gärtner H, Wagner B, Heinrich I and Denier C (2009) 3D-laser scanning: a new method to analyze coarse tree root systems. *Forest Snow and Landscape Research* 82: 95-106.

Haselsteiner R (2007) The Design of Dykes with Woody vegetation - German Standards, Experiences and Concepts. The vegetation Challenge: A scientific and engineering examination of managing vegetation along California's Central Valley levees that protect urban and rural areas from devastating floods. In *Levee Vegetation Symposium*, Sacramento (USA) 28-29 August 2007

Lucot E and Bruckert S (1992) Organisation du système racinaire du chêne pédonculé (*Quercus robur*) développé en conditions édaphiques non contraignantes (sol brun lessivé colluvial). *Annales Des Sciences Forestières* 49: 465-479.

Mériaux P and Royet P (2007) Surveillance, maintenance and diagnosis of flood protection dikes - A practical handbook for owners and operators. *Quae Cemagref*. 162 p.

Mériaux P, Tourment R and Wolff M (2005) Le patrimoine de digues de protection contre les inondations en France d'après la base de données nationales des ouvrages. *Ingénierie EAT N°spécial* 15-21.

Mériaux P, Vennetier M, Aigouy S, Hoonakker M and Zylberblat M (2006) Diagnosis and management of plant growth on embankment dams and dykes. In *Commission Internationale des Grands Barrages*, Barcelona. pp 1-20.

Pinhas M (2005) Confortement de digues étroites et boisées le cas des digues de l'Isère *Ingénieries EAT N° spécial* 179-184.

Stokes A and Mattheck C (1996) Variation of wood strength in tree roots. *Journal of Experimental Botany* 47: 693-699.

TAW (1994) Guide for the design of river dikes. pp 210. Technical Advisory Committee on Water Defences (TAW) and Center for civil engineering research and codes (CUR).

Unger P W and Kaspar T C (1994) Soil Compaction and Root Growth: A Review. *Agronomy Journal* 86: 759-766.

Vennetier M, Ripert C, Chandioux O, Mériaux P and Doirat G (2005) Gestion de la végétation des digues et berges sous contrainte de sécurité. *Ingénieries EAT N° Spécial*: 3-14.

Zanetti C, Vennetier M, Blanc G, Mériaux P, Royet P and Provansal M (soumis) Tree root architecture on dykes: a typology purpose. *Trees-Structure and Function*

Zanetti C, Vennetier M, Mériaux P, Royet P, Dufour S and Provansal M (2008) L'enracinement des arbres dans les digues en remblai : étude des systèmes racinaires et impacts sur la sécurité des ouvrages. *Ingénieries E A T* 53: 49-67.

1.3. Conclusions de l'article et perspectives

Les observations réalisées au cours des travaux effectués sur les digues ont mis en évidence que la morphologie des systèmes racinaires est, en effet, influencée par l'espèce végétale, l'âge des arbres, le milieu (nature et structure des matériaux) et le contexte (position de l'arbre sur la digue, contraintes locales). Cependant, certains paramètres, tels que les matériaux, semblent avoir une influence prédominante. La majorité des systèmes (79%) se développant dans les matériaux grossiers ont une structure racinaire mixte tandis que 67% des systèmes croissant dans les matériaux fins ont une structure fasciculée.

La position de l'arbre sur la digue agit sur deux paramètres qui peuvent influencer la morphologie des systèmes racinaires. Il s'agit de la pente et de l'accès à l'eau. La pente peut générer une dissymétrie du système racinaire. Généralement, sur terrain pentu, un grand nombre de racines se concentre dans le talus vers le haut de la pente, afin d'assurer l'ancrage de l'arbre. Les racines se concentrent également en direction de l'eau (contre-canal ou rivière) ou de zones plus fertiles et humides (berges). Il semblerait d'ailleurs qu'il y ait une adaptation de la structure des systèmes racinaires en fonction des besoins de l'arbre ou des opportunités offertes par le milieu (ressources accessibles : eau de pluie ou nappe).

Ceci a été observé de façon très nette sur les aulnes implantés sur le talus côté canal de la digue du Rhône à Lyon. L'adaptation de la structure des systèmes racinaires au milieu était très marquée, par une morphologie dite « duale » des souches implantées en bordure du canal (Figure III.Ch1.1). Les racines fines absorbantes se développent en milieu immergé soit dans des dépôts de sédiments fins soit directement dans l'eau – dans ce cas, les racines croissent dans le sens du courant (Figure III.Ch1.2).



Figure III.Ch1.1 : Souche d'aulne à morphologie duale, structure racinaire spécifique côté canal (racines fines absorbantes) et côté digue (racines ligneuses d'ancrage)



Figure III.Ch1.2 : Racines fines absorbantes s'étant développées en condition immergée

L'aulne est un des rares arbres dont les racines sont capables de capter l'oxygène contenu dans l'eau et pouvant ainsi se développer en condition immergée.

Ces observations ont mis en évidence la capacité d'adaptation des racines aux conditions locales et la différenciation des racines du point de vue de leur morphologie selon leur fonction (ancrage, prospection, absorption).

Au cours de ces travaux, différents types de racines, qui semblent communs à la plupart des espèces et des sites, ont été observés. Nous avons donc étudié les propriétés des racines en fonction de leurs différences morphologiques : c'est l'objet du chapitre 2.

Chapitre 2

Architecture racinaire

SOMMAIRE

2.1. Présentation de l'article II.....	88
2.2. Article II : Root systems architecture on dykes: a typology purpose	89
2.3. Conclusions de l'article et perspectives	104

Statut de l'article II

Soumis le xx/10/10 pour publication dans la revue *Trees – Struture and Functions* (IF : 1.6).

2.1. Présentation de l'article II

Durant les observations effectuées lors des chantiers d'extraction des systèmes racinaires sur les digues, nous avons identifié différents types de racines sur les souches de diverses espèces. Les mesures de l'architecture des racines demandent beaucoup de temps et de nombreux techniciens de la recherche ont participé à l'acquisition de ces données. Ces mesures détaillées visent à caractériser les modalités de décroissance en diamètre et de ramification de ces différents types de racines.

Selon les conseils de Frédéric Danjon (INRA Pierroton), spécialiste en mesure des systèmes racinaires ligneux par numériseur magnétique et analyse statistique sous AMAPmod, il était initialement prévu de relever les coordonnées spatiales (distance à la souche, azimut, profondeur par rapport à la surface) de chaque point mesuré.

Cependant, la collecte manuelle des coordonnées 3D, a été réalisée uniquement sur le chantier de Cosne-sur-Loire, en octobre 2008. Le recueil de ces informations nécessite en effet un temps d'acquisition beaucoup plus long en raison de la désorientation des souches excavées (nécessitant un travail considérable de repérage du volume à référencer). Lors de l'arrachage, du déplacement et du stockage des souches, les racines principales sont en parties brisées ou déformées. Dans certains cas, la coupe des racines principales de surface était nécessaire pour explorer le système en place plus en profondeur. Nous avons toujours noté la position de la rupture ou de la coupe pour repositionner ces racines sur la souche a posteriori mais dans le cas de ruptures accidentelles, les directions verticales et horizontales ne pouvaient pas être notées précisément. De même, une partie du système profond ne pouvait être observée qu'après arrachage et ces angles étaient alors en partie inconnus. Pour les systèmes racinaires de grande dimension (certains occupent un volume d'encombrement supérieur à 10 m³), les mesures imposent que la souche soit stockée à l'envers, reposant sur la base du tronc, et les racines pendent alors vers le sol, sans qu'il soit toujours possible de déterminer leur angle initial par rapport à la verticale et les variations longitudinales d'inclinaison. De plus, le fait que les mesures portent sur un échantillon de racines principales, et non sur l'ensemble de la souche, diminue l'intérêt de disposer des coordonnées spatiales exactes. Enfin, ces informations n'ont pas pu être exploitées du fait de la non compatibilité des données (rentrées sous tableur Excel) avec le logiciel VPlant. Le logiciel AMAPmod ayant été réédité sous Vplant en 2009, le langage de programmation a été remplacé par "Python" et les transformations des données acquises nécessitaient un remaniement trop important pour être intégrées sous Vplant.

Nous avons donc procédé à l'exploitation de la base de données globale sous Excel. Geoffrey Blanc, stagiaire en Master II GERINAT durant le premier semestre 2009, a contribué à la mise au point des tableaux et des macro-commandes permettant l'exploitation des données constituées de plus de 4300 points de mesures effectuées sur plus de 1000 racines. Ces analyses nous ont permis d'obtenir des résultats intéressants et notamment de mettre en évidence différents types de racines.

2.2. Article II : Root systems architecture on dikes: a typology purpose

Note : Certaines analyses doivent être complétées et les résultats synthétisés avant traduction et soumission de l'article à la revue.

Typologie racinaire chez les arbres : étude de cas sur les digues Tree root typology: a case study on dikes

Caroline Zanetti^{1a2}, Michel Venetier^{1b3}, Geoffrey Blanc^{1a}, Patrice Mériaux^{1a3}, Frédéric Danjon⁴, Mireille Provansal²³

¹Cemagref, 3275 route de Cézanne - CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5, France

^{1a}Hydraulics and Hydrology Research Unit and ^{1b} Mediterranean ecosystems and associated risks

² Université de Provence, Aix Marseille 1, 29 avenue Robert Schuman, 13100 Aix-en-Provence

³ ECCOREV FR 3098, Université Aix-Marseille, France

⁴ INRA Université de Bordeaux, UMR1202 BIOGECO, F-33610 Cestas, France

RESUME

180 arbres de 10 espèces végétales ont été déracinés sur des digues et berges de différentes rivières françaises et l'architecture de leur système racinaire a été analysée. Ces observations ont permis de mettre en évidence l'existence d'une différenciation morphologique chez les racines ligneuses. Deux principaux types racinaires ont été identifiés à partir de plusieurs paramètres, tels que le diamètre de départ des racines, leur longueur totale, leur taux de décroissance en diamètre et leur taux de ramification. Les racines longues se caractérisent par de faibles taux de décroissance et de ramification, à l'inverse des racines courtes pour lesquelles ces deux taux sont significativement plus élevés. Les pivots se distinguent par leur croissance verticale mais ne se différencient pas statistiquement des racines courtes. La différence entre les deux types de racines est plus ou moins marquée suivant les espèces et suivant le type de matériau sur lesquels elles poussent mais toujours significative. Elle n'évolue pas lorsque les racines grossissent et vieillissent, car alors le taux de ramification diminue tandis que le taux de décroissance augmente de façon similaire pour les deux types.

Mots clefs : racines ligneuses, architecture racinaire, typologie, décroissance, ramification, digue en terre.

INTRODUCTION

Le développement des systèmes racinaires ligneux fragilise les ouvrages hydrauliques en terre. Le renversement des arbres génère un risque d'érosion externe tandis que la croissance puis la décomposition des racines induisent un risque d'érosion interne par formation de renard hydraulique (Corcoran 2009; Haselsteiner 2007; Mériaux et al. 2006; Zanetti et al. 2008).

Les ruptures d'ouvrages ont entraîné par le passé des pertes de vies humaines et des conséquences économiques très lourdes. A titre d'exemple, les récentes inondations dans le sud-est de la France cumulent un coût de plusieurs milliards d'euros. De nos jours, le nombre d'incidents mortels liés à des ruptures d'ouvrages (inondations de la Nouvelle Orléans aux USA suite à l'ouragan Katrina en août 2005, et en ce début d'année les inondations dans l'Ouest de la France suite à la tempête Xynthia) justifient un regain d'études et de contrôles sur de tels ouvrages.

A l'échelle mondiale, le réseau d'ouvrages hydrauliques est très important, avec à titre d'exemples, plus de 160 000 km de digues et barrages aux USA, plus de 20 000 km aux Pays-Bas. En France, on dénombre près de 10 000 km de digues de protection contre les inondations, 4000 km de digues de canaux de navigation, 1000 km de digues d'aménagements hydro-électriques (Mériaux et al. 2005; Daly et al. 2005) et des dizaines de milliers de barrages en terre. Ces ouvrages, anciens pour la plupart, sont souvent le support d'une végétation arborescente, parfois dense et âgée (Venetier et al. 2005; Pinhas 2005). Cet état s'oppose aux normes de sécurité qui recommandent le maintien d'un couvert herbacé ras et l'absence totale de végétation ligneuse sur les digues et barrages en terre (Mériaux et al. 2006; Mériaux and Royet 2007). Mais dans certains contextes urbains ou agricoles, cette végétation fait office d'espace vert et de loisir ou de corridor biologique, qui exige une gestion raisonnée et un compromis entre fonctions sociales ou écologiques et risque. L'évaluation du risque exige une connaissance du développement et de l'architecture des systèmes racinaires dans les digues. Or il y a très peu de références scientifiques dans ce domaine (Berry 2009).

Par contre, l'influence de l'architecture des systèmes racinaires sur les mouvements de terrain en pente ont fait l'objet de nombreuses études (Nicoll et al. 2005; Reubens et al. 2007). Le rôle des systèmes racinaires sur la stabilité des berges de cours d'eau a également été analysés en détails (Abernethy and Rutherford 2000a; 2000b; 2001).

Les systèmes racinaires des plantes ligneuses étant fortement hiérarchisés et structurés, leur étude doit s'appuyer sur une analyse architecturale et sur des typologies de racines. Cette analyse architecturale est basée sur la distribution spatiale, la morphologie, l'inclinaison et le nombre des racines et de ramifications. Cette méthode permet d'étudier les stratégies d'adaptation des systèmes en fonction des espèces et du milieu (Atger 1991; Atger and Edelin 1994a), de déterminer les paramètres influant sur l'architecture des systèmes racinaires, comme l'effet d'un vent dominant (Danjon et al. 2005) ou de créer des modèles de croissance des systèmes racinaires (Charles-Dominique et al. 2009; Collet et al. 2006; Jourdan and Rey 1997).

Des mesures précises de l'architecture racinaire nécessitent l'excavation des souches. Ceci induit la mise en œuvre de moyens lourds, coûteux et chronophage (Danjon and Reubens 2008; Smit and Bengough 2000). Généralement, les études sur les systèmes racinaires de ligneux portent sur un nombre réduit d'individus (jusqu'à une trentaine de systèmes racinaires) et sur de petits ou jeunes arbres (Vercambre et al. 2003; Danjon et al. 1999b; Danjon et al. 2005).

Les méthodes non-destructives du type radar de sondage souterrain, ne permettent pas une caractérisation précise de la taille et de l'architecture de ces systèmes (Danjon et Reubens 2008). La mesure de l'architecture complète des racines de structure, c'est à dire de la topologie et de la géométrie 3D de toutes les racines (> 3 cm de diamètre) d'un système racinaire, peut être effectuée sur des arbres arrachés. Les mesures peuvent être manuelles (Dupuy et al. 2005) ou semi-automatiques, utilisant un numériseur magnétique 3D (Danjon et al. 2005; Khuder et al. 2007; Nicoll et al. 2006). Ces mesures sont rapides sur des arbres jeunes, beaucoup plus longues sur des arbres de grande taille (Danjon et Reubens 2008) ce qui rend difficile la constitution d'un échantillon important et représentatif de grands arbres. Dans le cas d'arbres se développant sur des sols homogènes, l'architecture 3D peut aussi être obtenue en mesurant l'architecture de quelques racines représentatives, puis en reconstruisant le système en entier utilisant un modèle de développement construit sur la bases des mesures disponibles (Collet et al. 2006; Danjon and Reubens 2008). Cependant, cette technique n'est pas adaptée aux milieux fortement hétérogènes et contraignants comme c'est généralement le cas des digues.

Avant la mise au point des techniques de numérisation 3D, l'étude de l'architecture racinaire a fait l'objet de mesures partielles ou qualitatives (Danjon et Reubens 2008; Smit and Bengough 2000). Des analyses en deux dimensions ont été réalisées en comptant et mesurant les racines sur les parois de tranchées. Sur le même principe, on a utilisé la surface et le nombre des racines recoupant des cylindres concentriques de diamètres décroissants autour des souches (Drexhage et al. 1999). Une classification qualitative des racines a été proposée sur la base du mode de ramification, en distinguant aux deux extrémités les types en "arêtes de poisson" (herringbone) et "dichotomique" (dichotomous) (Fitter 2002). L'analyse fractale des ramifications (fractal branching) a permis de caractériser les relations hiérarchiques et spatiales entre ramifications au sein des racines individuelles et de reconstruire des systèmes racinaires entiers à partir d'un nombre limité de mesures: surfaces en coupe des racines avant et après ramification et longueur des segments entre ramifications (Van-Noordwijk and Purnomosidhi 1995).

Les classifications ou typologies des systèmes racinaires sont généralement basées sur la structure globale du système racinaire et mettent en avant les déterminismes liés à l'espèce végétale (Atger and Edelin 1994a; Atger 1991, Collet et al. 2006) et l'adaptation des systèmes aux contraintes du milieu (Foussadier 2003; Fitter and Stickland 1991). A l'échelle de la racine, la mise en place de l'architecture racinaire est le résultat des processus de croissance primaire (en longueur) et secondaire (en diamètre) (Barthélémy and Caraglio 2007), de ramification (production d'axe secondaire) et de réitération (duplication des racines) (Atger and Edelin 1994b; Barthélémy et al. 1995; Atger 1991). Les racines se caractérisent donc par des propriétés architecturales et fonctionnelles (Atger 1991). Il est admis que les racines ligneuses, ou charpentières assurent l'ancrage de l'arbre dans le sol, la prospection du milieu et le stockage des réserves nécessaire à la reprise de la végétation au printemps, tandis que les racines fines assurent l'alimentation en eau et la nutrition minérale de l'arbre à partir des ressources du sol (Fitter 2002).

Les objectifs de cette étude sont d'analyser la variabilité morphologique des racines ligneuses d'arbres sur des critères d'architecture (longueur, décroissance et ramification) et d'en déterminer une typologie. Nous avons cherché à savoir si l'espèce et l'environnement dans lequel se développe l'enracinement influencent cette morphologie et quels risques génèrent les différents types de racines pour les ouvrages hydrauliques. Les analyses portant sur les systèmes entiers sont traitées séparément et font l'objet d'un autre article (cf. Chapitre 2, Article II).

MATERIELS ET METHODES

Afin de caractériser le développement des racines dans les digues, et d'évaluer leur danger potentiel pour la sécurité de ces ouvrages, nous avons échantillonné 180 systèmes racinaires de grands arbres sur les digues de fleuves et rivières français (Rhône, Loire, Isère, Durance et Bieugne (Tableau 1). Une analyse 3D complète n'était pas envisageable sur un tel nombre d'individus. Nous avons choisi un sous-échantillon de 79 systèmes racinaires pour une analyse fractale de ramification, qui est détaillée dans les résultats de cet article, les autres étant mesurés plus sommairement et utilisés pour l'interprétation et la généralisation des résultats.

Le choix des arbres étudiés repose sur un échantillonnage stratifié prenant en compte les espèces, la dimension des arbres, les matériaux constitutifs de la digue et la position sur l'ouvrage, en faisant l'hypothèse que chacun de ces critères peut influencer l'architecture des racines. Dix essences fréquemment rencontrées sur ces ouvrages, ont été observées : (i) huit dans des vallées de basse altitude : chênes (*Quercus pubescens* Willd., *Q. ilex* L.) érables (*Acer campestre* L. et *A. negundo* L.), frêne (*Fraxinus excelsior* L.), peuplier (*Populus nigra* L.),

robinier (*Robinia pseudoacacia* L.), saule arborescent (*Salix alba* L.) et (ii) deux en montagne ; mélèze (*Larix decidua* Mill.) et pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.).

River site Longitude/Latitude	Year	Type of dike	Excavated (analysed) tree number	Species*	Trees age (min/average/max)	DBH cm (min/average/max)
Rhône - Péage de R. 04°46'E / 45°21'N	2003	Canal	22	6, 9	20/22/24	20/30/50
Isère - Grenoble 06°00'E / 45°25'N	2003	Flood protection	38	3, 6, 9	19/45/57	12/26/50
Rhône - St Vallier 04°48' E / 45°11'N	2005	Canal	18	5, 9	12/20/27	15/25/35
Rhône - Montélimar 04°43'E / 44°32'N	2007	Canal	14 (12)	6, 7, 8, 9	8/26/43	11/26/40
Rhône - Lyon 05°02'E / 45°48'N	2007	Canal	27 (18)	1, 3, 6, 7, 9	10/35/63	20/29/58
Durance - Pertuis 05°30'E / 43°40'N	2007	Flood protection	(5)	6, 7	-	37/70/130
Isère - Grenoble 05°47'E / 45°11'N	2008	Flood protection	26 (18)	3, 6, 7, 9, 10	8/25/49	20/65/150
Loire - Cosne sur L. 02°54'E / 47°24'N	2008	Flood protection	22 (20)	2, 3, 6, 7, 9, 10	18/31/45	24/62/120
Bieugne - Castérino 07°31'E / 44°04'N	2009	Flood protection	8 (6)	4, 5	46/62/71	26/41/56
Total			180 (79)	1 - 10	8/35/71	11/50/150
*(1) <i>Acer Campestre</i> , (2) <i>Acer Negundo</i> , (3) <i>Fraxinus excelsior</i> , (4) <i>Larix decidua</i> , (5) <i>Pinus Sylvestris</i> , (6) <i>Populus Nigra</i> , (7) <i>Quercus Pubescens</i> , (8) <i>Quercus Ilex</i> , (9) <i>Robinia pseudoacacia</i> , (10) <i>Salix alba</i>						

Tableau 1: Sites des interventions menées sur les digues, nombre, espèce et âge des arbres étudiés. DBH = diameter at breast height

Tous ces arbres sont issus de semis naturels ou de rejets de souche, à l'exception de quelques pins sur la digue de St Vallier qui ont été plantés.

Dans un premier temps, in situ, les arbres sélectionnés sont abattus (à 1m du collet) et les systèmes racinaires sont extraits au moyen d'une pelle mécanique puissante dotée d'un godet de 40 à 60 cm de large. L'excavation se fait en trois étapes : (1) le dégagement des racines superficielles du collet vers la périphérie, à l'aide de la pelle mécanique dans un premier temps et à la main pour la finition afin de limiter les dégâts. Certaines de ces racines sont suivies sur toute leur longueur à partir du point d'embranchement sur la souche, puis, après marquage du point d'insertion, sont coupées à la base et mises de côté pour les mesures, (2) le dégagement des racines profondes par creusement, en préservant également celles qui peuvent l'être, et enfin, (3) l'excavation de la souche soit par traction verticale sur le tronc (à l'aide d'élingues) si la souche dispose d'un pivot, soit par soulèvement à l'aide du godet lorsque la souche est trop résistante ou ne possède pas de pivot. Parallèlement, des prélèvements de matériaux sont effectués dans les différentes strates du substrat pour une caractérisation physique (texture, granulométrie) et chimique. Cette méthode d'excavation est assez rapide et pratique mais génère des pertes d'informations liées à la casse de certaines racines. Le dégagement des racines, même superficielles, par air comprimé ou eau sous pression est impossible dans les matériaux grossiers. Il serait beaucoup trop long pour les gros systèmes racinaires en matériau fin, au vu des objectifs de ce travail qui est de caractériser un grand nombre d'individus.

Au cours de l'excavation, la structure du système racinaire est décrite (distribution spatiale et dimensions des racines, directions préférentielles) photographiée et schématisée. Une fois les souches arrachées, le reste du tronc est coupé, puis la souche mise en dépôt les racines vers le haut et débarrassée des matériaux restants. La description de la structure des systèmes racinaires est complétée par l'acquisition de données quantitatives détaillées sur les racines. Nous avons choisi de mesurer les racines représentatives des différentes classes de diamètres et positions sur la souche. Chaque racine choisie est découpée en segments délimités par les ramifications. On mesure pour chaque segment sa longueur, son diamètre initial et final, et le diamètre de chaque ramification (Kalliokoski et al. 2010; Nygren et al. 2009; Soethe et al. 2007). Un code hiérarchique est attribué à chaque racine mesurée: 1 à n pour les racines primaires, n.1 à n.x pour les racines secondaires issues de la racine n, n.x.1 à n.x.y pour les racines tertiaires etc. Il permet d'enregistrer l'architecture racinaire (ordre d'apparition des ramifications) et d'identifier les racines dans la base de données. L'angle d'insertion des ramifications a aussi été noté sur certains sites.

Au total, 1043 racines ont été mesurées, dont 282 entières (jusqu'à l'apex), soit 1127 m en longueur cumulée. Les racines cassées mais en bon état et présentant plusieurs ramifications ont été mesurées jusqu'à leur point de rupture. Les racines cassées à proximité du collet ou fortement dégradées lors de l'excavation n'ont pas été prises en compte. Le nombre total de segments mesurés est de 4370, soit un point de mesure tous les 25 cm en moyenne.

	Acer campestre	Acer negundo	Fraxinus excelsior	Larix decidua	Pinus sylvestris	Populus nigra	Quercus ilex	Quercus pubescens	Robinia p- acacia	Salix alba	Total
Number of analysed tree root systems	3	5	14	4	2	13	2	15	16	5	79
Number of measured roots by species	33	37	212	31	46	171	52	145	246	70	1043
Measured root length (m) by species	32.86	27.75	232.69	49.08	66.98	156.24	41.99	130.05	305.49	84.21	1127.36
Number of measured segments	140	160	868	200	253	816	75	553	1012	293	4370

Tableau 2 : Nombre d'arbres et de racines mesurées par espèces, longueur totale et nombre de segments

Nous n'avons pris en compte que les racines ligneuses, les racines très fines (< 0.3 mm), n'ont pas été mesurées. Pour l'échantillonnage, nous avons considéré trois types de racines et trois classes de taille. Pour les types, nous avons distingué les racines traçantes [T] parallèles à la surface du sol, obliques [O] pénétrant le remblai et pivotantes [P] plongeant verticalement dans le sol, qui sont repérées au fur et à mesure de l'arrachage. Il s'agit d'une classification courante dans la littérature scientifique (Koestler et al. 1968, Atger and Edelin 1994a; Danjon et al. 2005; Drexhage and Gruber 1998; Vercambre et al. 2003). Pour la taille, le diamètre de départ des racines sépare les "grosses" ($G \geq 5\text{cm}$), "moyennes" ($5\text{cm} > M > 1\text{cm}$) et "fines" ($1\text{cm} \geq F > 0.3\text{cm}$). Le seuil de 5 cm de diamètre utilisé pour caractériser les racines dites « grosses » a été déterminé en fonction du risque induit pour l'ouvrage. On considère, en effet, que la présence de racines ligneuses de plus de 5 cm de diamètre est susceptible de diminuer l'intégrité du remblai (Zanetti et al. 2008). Après mesure, les racines traçantes et obliques ont été classées visuellement dans 2 catégories : les racines montrant un faible taux de décroissance et de ramification (Figure 1) appelées par la suite racines Longues (L) et les racines ayant des valeurs plus élevées pour ces deux taux (Figure 2) et appelées racines courtes (C). Cette classification à dire d'expert est relative à chaque arbre et chaque site et ne se base donc pas sur de valeurs et seuils précis.



Figure 1 : Racine traçante Grosse de type Longue (Frêne)



Figure 2 : Racine oblique Grosse de type Courte (Frêne)

Pour chacune des 1043 racines analysées, plusieurs variables ont été calculées:

- Dec : Taux de décroissance. Il exprime la perte en diamètre d'une racine sur l'ensemble de sa longueur.

Dec = ($\text{ØDr} - \text{ØAr}$) / Lr où, toutes les mesures étant exprimées en mètre:

ØDr est le diamètre au départ de la racine

ØAr est le diamètre à l'extrémité distale mesurée de la racine

Lr est la longueur totale de la racine

Certaines racines, particulièrement les plus grosses et vieilles, présentent une zone initiale de très forte décroissance ZRT – Zone of Rapid Taper (Danjon and Reubens 2008). Le taux de décroissance peut en tenir compte. Mais en raison de la forte variabilité de l'importance de cette ZRT entre les différentes espèces étudiées, et en raison de l'âge variable des arbres sur les différents aménagements, nous l'avons délimitée d'après Danjon et al. (2005) et éliminée de nos calculs pour cette étude où ces espèces et aménagements ne sont pas séparés dans la majorité des calculs.

- Def : Défilement. Il exprime la décroissance d'un segment entre deux ramifications (Soethe et al. 2007).

Def = $(\text{ØDs} - \text{ØAs}) / \text{Ls}$ où, toutes les mesures étant exprimées en mètre:
 ØDs est le diamètre au départ du segment, après une ramification,
 ØAs est le diamètre à l'extrémité du segment, avant la ramification suivante,
 Ls est la longueur totale du segment.

Le taux de décroissance et le défilement peuvent aussi être exprimés en fonction du carré des diamètres (décroissance quadratique) pour être mis en relation avec le facteur P de décroissance par ramification (cf. ci-dessous) et pour la comparaison avec des données de la littérature.

- Ram: Taux de ramification (nombre/m)

Ram = $\sum \text{Ram} / \text{L}$ où,
 $\sum \text{Ram}$ est le nombre total de ramifications portées par la partie mesurée de la racine
 L est la longueur mesurée de la racine en mètres

- P : il exprime le gain (ou la perte) de la surface en coupe des racines au niveau des ramifications (Nygren et al. 2009; Soethe et al. 2007).

P = $\text{D}^2_{\text{avant}} / \sum \text{D}^2_{\text{après}}$ où,
 $\text{D}^2_{\text{avant}}$ = diamètre quadratique de la racine avant une ramification,
 $\sum \text{D}^2_{\text{après}}$ = somme des diamètres quadratiques de tous axes en aval de la ramification.

- R : ratio entre la perte en diamètre de l'axe principal et le diamètre de la ramification (ou la somme des diamètres des ramifications) hors axe principal. Il traduit l'influence de la taille des ramifications sur la variation de taille de l'axe principal.

R = $(\text{D}^2_{\text{avant}} - \text{D}^2_{\text{après}})_{\text{axe principal}} / \sum \text{D}^2_{\text{ramif}}$

On peut l'exprimer en diamètres (il exprime la décroissance observée visuellement) ou en diamètres quadratiques, il traduit alors le rapport des surfaces et donc, fonctionnellement, les variations de surfaces conductrices de sève ou des ratios de résistance mécanique.

- Pr/ram : rapport entre le diamètre de l'axe principal en amont et le diamètre des ramifications. Il exprime la taille relative des ramifications par rapport à celle de l'axe principal.

Pr/ram = $\text{D}_{\text{avant}} / \sum \text{D}_{\text{ramif}}$

Les analyses granulométriques (par tamisage humide et à sec, mailles de tamis de 1 mm à 80 µm - Norme NF P 94-056) puis sédimentométriques (par mesure de la concentration de particules en suspension au densitomètre - Norme NF P 94-057) ont été effectuées sur les échantillons prélevés sur le terrain autour des souches afin de caractériser les matériaux des différents sites étudiés. Nous avons choisis de regrouper les matériaux en deux catégories : les matériaux "grossiers" correspondant aux classes de substrat caillouteux [C] à sablo-graveleux [SG] (d'après la Norme GTR NFP 11-300), et les matériaux "fins" rassemblant les substrats sableux [S], limoneux [L] et argileux [A] (d'après l'abaque triangulaire de Taylor). Pour ce travail, seuls les arbres dont l'enracinement est entièrement situé sur un matériau homogène et très caractéristique (pas d'intermédiaire entre les deux catégories) sont pris en compte.

Les différentes variables ont été analysées en fonction des espèces, des types de racines et de leur taille et de la catégorie des matériaux où elles se développent. Pour valider certaines analyses de décroissance et de longueur des racines, nous avons traité séparément les 282 racines mesurées jusqu'à leur extrémité, c'est-à-dire n'ayant pas été cassées lors de l'excavation. Ce sous-échantillon est représentatif de l'ensemble de l'échantillon du point de vue des espèces végétales, du type de matériau et de la taille des arbres. Il y manque cependant les plus grosses racines Longues qui n'ont souvent pas pu être dégagées entièrement sans dégâts en raison de leur très grande longueur (jusqu'à plus de 10 m). Pour l'analyse des défilements, tenant compte de la difficulté de mesure des décroissances en diamètre significatives sur de très faibles distances pour des racines dont la section est rarement cylindrique et souvent déformée par des obstacles, on a comparé les résultats avec l'ensemble des segments ou seulement les segments de plus de 5 cm de longueur.

Le croisement des catégories et classes de racines s'exprime par la suite dans l'ordre "type taille matériau" en trois lettres, type et taille accolées en majuscule, et le type de matériau s'ajoutant en minuscule après un point. Ainsi des groupes de racines notés "C", "F", "I", "PM", "LG.f", "CF.g" correspondent respectivement aux groupes racines de type Courte (toutes tailles et matériaux confondus), racines fines (tous types et matériaux confondus) Pivots de taille moyenne (tous matériaux confondus), racines de type Longue grosse sur matériau fin, et racines de type Courte fine sur matériau grossier.

La distribution statistique de la plupart des données recueillies ne correspondant pas à une loi normale, des tests non-paramétriques ont été utilisés pour comparer les groupes correspondant aux types de racines et à leurs dimensions. Test de Kruskal-Wallis pour la comparaison de groupes multiples, puis, en cas de différence détectée, test de Nemenyi (1963) pour comparer deux à deux les groupes. Les analyses ont été réalisées à l'aide

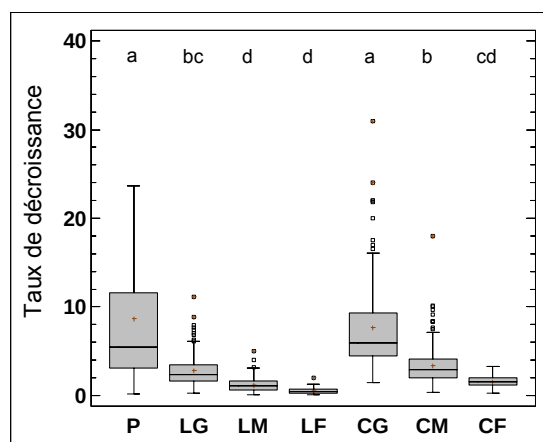
du logiciel R (R_Development_Core_Team, 2004). Les groupes où le nombre d'observations était insuffisant (<30) n'ont pas été pris en compte, ces groupes étant nombreux lorsqu'on croise trois variables (3 types et 3 tailles de racines et 2 catégories de matériaux soit 18 groupes potentiels).

RESULTATS

Décroissance globale des racines et longueur

Tous types de racines confondus, le taux de décroissance diminue significativement entre les classes de racines « grosses » et « moyennes » (-60 %), et entre les « moyennes » et « fines » (-50 %). La décroissance racinaire diminue donc régulièrement avec le diamètre de départ des racines. Cette différence de décroissance avec la taille est aussi statistiquement significative et du même ordre de grandeur au sein de chaque type de racines, Pivots, Courtes et Longues (Figure 3).

Figure 3 : Taux de décroissance moyen par type racinaire. Le rectangle délimite les deux quartiles centraux, séparés par la médiane, la croix indique la moyenne, les barres indiquent les 10^{ème} et 90^{ème} percentiles et les points les valeurs extrêmes.



Pour les grosses racines quel que soit leur type, la décroissance est souvent plus forte sur dix à trente centimètres à proximité de la souche, ce qui correspond à la ZRT. Puis chez les longues elle se stabilise pour rester régulière jusqu'à l'extrémité de la racine (un ajustement polynômial ne donne pas de meilleur coefficient de corrélation que l'ajustement linéaire), tandis que chez les courtes elle diminue régulièrement (l'ajustement polynômial d'ordre 2 donne des coefficients de corrélation bien meilleurs que l'ajustement linéaire, de l'ordre de +0.05 à +0.15. La ZRT correspond à une zone plus densément ramifiée pour tous les types de racines. On trouve une ZRT essentiellement sur les racines primaires partant de la souche ou plus rarement sur les plus grosses les racines secondaires partant d'une ZRT de racine primaire très près de la souche.

Les petites différences de décroissance selon les matériaux au sein des types de racines, qu'elles soient classées par taille, par type ou en croisant ces deux catégories, ne sont pratiquement jamais significatives (Tableau 4), et sont de sens parfois opposés. On peut donc penser qu'il n'y a pas d'effet significatif du type de matériau sur la décroissance racinaire, ou que cet effet s'il existe est masqué par d'autres facteurs.

Aucune relation significative n'a pu être mise en évidence entre la dimension des souches (diamètre au collet) et le taux de décroissance des racines par type. La variabilité de cette relation est importante en fonction des espèces, et la taille de la souche ne reflète pas forcément l'âge et la taille des racines, notamment pour les arbres recoupés plusieurs fois.

Pris globalement par type, les pivots ont une décroissance en diamètre significativement plus forte que les racines courtes. Cette distinction vient de la différence de diamètre moyen entre ces deux types de racines, car à diamètre égal, Pivots et Courtes ont des taux de décroissance très proches. Par contre, globalement, comme par catégorie de dimension (sauf les plus petites), les racines Courtes ont une décroissance significativement supérieure à celle des Longues (Figure 3). Cette différence confirme la pertinence du choix visuel effectué après la notation au sein des racines traçantes et obliques, bien que ce choix soit relatif à chaque arbre, espèce et site.

Longueur des racines

Si les racines de type Longue atteignent facilement 7 m de longueur et souvent bien plus, les Courtes dépassent rarement 2 m de longueur. A diamètre de départ identique, une Longue est deux à trois fois plus longue qu'une Courte, ce que explique la décroissance bien plus faible des racines Longues. Le Tableau 3 montre qu'à diamètre équivalent, les Courtes ont les mêmes dimensions quel que soit le matériau, tandis que les Longues sont plus longues sur matériaux grossiers, la différence étant d'autant plus grande en pourcentage que le diamètre est petit.

Tableau 3: Longueur des racines selon leur type et en fonction des matériaux.
Moyennes calculées à partir de 282 racines mesurées jusqu'à leur extrémités.

	P	LG	LM	LF	CG	CM	CF
Longueur moyenne / type	99.5	273.4	135.1	90.9	103.3	61.7	43.1
Lg moy sur matériau fin	92.2	228.5	106.0	72.7	113.1	60.3	44.3
Lg moy sur matériau grossier	105.5	333.3	173.8	139.3	95.2	62.5	41.4
	NS	***	***	**	NS	NS	NS
Gain relatif (grossier-fin)/fin	0.14	0.46	0.64	0.92	-0.16	0.04	-0.07

Taux de ramification

Le taux de ramification dépend en partie de la taille des racines. Il est significativement plus élevé sur les racines fines (7.07) que sur les moyennes (5.95) et grosses (5.02 sans pivots, 6.10 avec pivots) qui ne sont pas différentes entre elles.

Tous types racinaires et tailles confondus, le taux de ramification n'est pas différent ($p = 0.46$) entre matériau fin (5.91) et matériau grossier (5.62).

Les résultats ci-dessus cachent des interactions entre types, tailles et matériaux. Alors que chez les racines de types Longues et Courtes le taux de ramification des grosses est globalement moins élevé que chez les moyennes

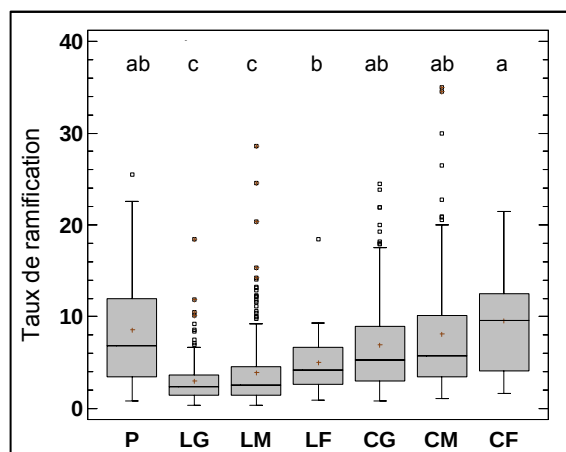


Figure 4 : Taux de ramification moyen par type racinaire. Le rectangle délimite les deux quartiles centraux, séparés par la médiane, la croix indique la moyenne, les barres indiquent les 10^{ème} et 90^{ème} percentiles et les points les valeurs extrêmes.

et petites, les Pivots, pris en compte dans l'analyse, qui sont tous dans la catégorie des grosses racines, ont un taux de ramification élevé, non différent statistiquement des racines fines (Figure 4). Par ailleurs, la différence entre fines, moyennes et grosses au sein d'un type racinaire donné n'est significative que chez les racines Longues.

En moyenne, les racines fines et moyennes ainsi que les pivots semblent plus ramifiées sur matériaux fins que sur matériau grossier, mais la variabilité est forte et la différence n'est significative que pour les racines fines. Les grosses racines Longues et Courtes montrent la tendance inverse. Comme le nombre de données pour les racines fines est assez faible sur chacun des matériaux, on peut douter globalement du fait que le type de matériaux influence le taux de ramification.

C'est pour les types racinaires que les variations du taux de ramification sont les plus claires (Figure 4 et Tableau 4). Il est 2 à 2,5 fois plus élevé chez les racines de type Courtes et les Pivots que chez les Longues. Cette différence est significative globalement, et pour le reste, en regroupant les racines par taille ou par combinaison taille/matériau.

Taux de décroissance		
Type	Moy	Groupes
PG.f	13.80	a
PG.g	9.50	a
CG.f	7.63	a
CG.g	7.43	a
CM.g	3.44	b
CM.f	3.20	b
LG.f	3.06	b c
LG.g	2.50	b c
CF.g	1.66	c
CF.f	1.46	c
LM.f	1.28	c
LM.g	1.00	c d
LF.f	0.56	d
LF.g	0.44	d

Taux de ramification		
Type	Moy	Groupes
CF.f	10.22	a
PG.f	9.58	a
CM.f	9.28	a
CF.g	8.80	a
CG.g	7.62	a
PG.g	7.12	a
CM.g	7.12	a
CG.f	6.42	a
LF.f	5.50	a b
LM.f	4.39	b c
LF.g	3.77	b c
LG.g	3.27	b c
LM.g	3.02	c
LG.f	2.78	c

Tableau 4 : Comparaison à l'aide du test de Nemenyi, pour les taux de décroissance et de ramification, des groupes de racines combinant : type, taille et matériaux. Les groupes marqués d'une même lettre ne diffèrent pas statistiquement. Le croisement de ces deux variables est visualisé dans la Figure 5.

Défilement des segments

Note : Dans les analyses du défilement sur les segments de plus de 5 cm de longueur, un certain nombre de groupes combinant le type de racines avec leur taille ou le matériau ont été exclus en raison du trop petit nombre de données.

Hors ZRT, et pour les segments de longueur supérieure à 5 cm, les racines se différencient par tailles (Tableau 5) : les grosses ont un défilement supérieur aux fines et aux moyennes. Ces deux dernières ne diffèrent pas entre elles, principalement à cause de la forte variabilité et de quelques valeurs extrêmes. Le même résultat est obtenu avec l'ensemble des segments. Les racines fines se distinguent des moyennes par des pourcentages différents de

segments à faible défilement, cette différence étant aussi importante entre grosses et moyennes pour les valeurs inférieures à 2 et 3 cm/m.

types	moy	groupes	valeurs de défilement par segment			
			<1cm/m	<2cm/m	<3cm/m	<5cm/m
F	0.60	A	73%	94%	98%	100%
M	1.17	A	63%	80%	90%	96%
G	2.34	B	55%	66%	74%	84%

Tableau 5 : défilement par taille de racine et distribution du défilement par diamètres.

Le défilement dans les ZRT est de 4.45cm/m, une ZRT n'étant décelable que sur les grosses racines.

Si on calcule les variations de défilement par rapport à la taille de chaque segment, indépendamment du diamètre de départ de la racine, on ne trouve pas de différence significative.

Types	fin	grossiers
PG	3.82	2.85
CM	1.72	1.89
CG	3.34	2.93
LF	0.53	0.27
LM	0.89	0.63
LG	1.41	1.07

Le défilement n'est pas différent suivant les matériaux si on le considère toutes racines confondues, mais de très peu (moyennes 1.95 et 1.61 pour les matériaux fins et grossiers respectivement, $p = 0.06$). En regroupant les mesures par catégories, on observe des différences importantes pour les racines Longues et les Pivots, moins pour les racines Courtes. Le test unilatéral en observations paires des matériaux fins et grossiers pour les 6 combinaisons type/matériaux ayant un nombre suffisant de mesures est significatif ($p = 0.03$, Tableau 6).

Tableau 6 : Comparaison des défilements sur matériaux fins et grossiers par combinaison type / taille.

Parmi les trois types de racines (P, L et C) seul le type L se distingue statistiquement des deux autres. Il montre aussi un pourcentage beaucoup plus élevé de segments à faible défilement (Tableau 7). Les pivots ont un pourcentage plus élevé que les racines courtes de valeurs faibles et de valeurs très fortes. Le faible nombre de valeurs mesurées sur les Pivots pour des segments de plus de 5 cm de long (197 contre plus de 800 mesures pour les deux autres catégories pourrait jeter un doute sur ce résultat, en raison notamment d'un nombre élevé de valeurs nulles. Cependant, le résultat est identique si l'on considère l'ensemble des segments (360 mesures sur pivots).

Types	moy	groupes	Déf<2 cm/m	Déf<3 cm/m	Déf<5 cm/m
P	3.19	A	65	68	77
C	2.54	A	59	70	83
L	0.96	B	84	92	98

Tableau 7 : Défilement par type de racines et distribution du défilement par diamètres.

Le croisement type/taille des racines confirme que le défilement des grosses racines est supérieur à celui des racines de taille inférieure: moyennes pour les pivots et fines pour les types Courtes et Longues (Tableau 8).

Type	moy	groupes
PG	3.34	A
CG	3.02	A
CM	1.81	A B
PM	1.25	B C
CF	1.00	B C
LG	1.21	C
LM	0.78	C D
LF	0.46	D

Tableau 8 : Défilement par combinaison des types et tailles de racines

La comparaison multiple des combinaisons type/matériau globalement et par type de racine montre que des différences significatives sont observées entre matériaux pour les racines Longues et les racines Courtes de taille

moyenne mais pas pour les Pivots et les grosses racines Courtes, bien que pour ces dernières les écarts aillent dans le même sens (Tableau 9).

Type	taille	groupes
PG.f	3.82	A
CG.f	3.13	A
CG.g	2.93	A
PG.g	2.85	A
CM.g	1.89	A
CM.f	1.72	A B
LG.f	1.41	A B
LM.f	0.89	B C
LG.g	1.07	C D
LM.g	0.63	D

Tableau 9 : Comparaison multiple des défilements des combinaisons racines/type/matériau

Rapports des diamètres de ramification et de l'axe principal

Le facteur P, variation des diamètres quadratiques au niveau des ramifications, a des valeurs peu variables en fonction de la taille des racines, mais cependant est significativement plus élevé pour les grosses (1.075) comparées aux moyennes (1.040) et aux fines (1.047) qui ne se distinguent pas entre elles. Le test de Nemenyi montre que la différence entre grosses et fines est presque significative (valeur 2.390 pour un seuil critique de 2.394). La différence entre ces groupes vient de la distribution des valeurs, les grosses ayant un nombre moins important de faibles valeurs : 20% de valeurs <0.9 contre respectivement 30 et 40% pour les moyennes et fines. La distribution des valeurs des racines grosses et moyennes suivant une loi normale, la comparaison de ces deux tailles par un test T confirme que leur différence est hautement significative ($p = 0.006$).

Aucune différence n'apparaît pour le facteur P entre matériaux fins et grossiers globalement : respectivement moyenne 1.05 contre 1.07, médiane 1 contre 0.99, écart type 0.30 contre 0.34.

Le facteur P distingue significativement les trois types de racines : les Pivots (1.134) ont les valeurs les plus élevées, suivis des Courtes (1.095) et des Longues (1.015).

La combinaison du type et de la taille (Tableau 10) permet de confirmer partiellement les différences induites chacune de ces catégories : pour la taille, les LF sont significativement inférieures aux LG et les PM aux PG. Par contre les Courtes ne sont pas différentes suivant la taille. Pour les types, les PG sont supérieurs au CG et aux LG, de même que les PM et CM, très peu différents entre eux, sont supérieurs aux LM. Les CF n'avaient pas un effectif suffisant pour cette analyse. Les LF sont logiquement à la dernière place.

Type	moy	groupes
PG	1.134	A
CM	1.099	A B
CG	1.097	A B
PM	1.076	B
LG	1.037	B
LM	1.000	C
LF	0.940	C

Tableau 10: Facteur P en fonction de la combinaison type et taille de racines.

Le croisement des groupes ci-dessus avec les matériaux confirme qu'il n'y a pas, même en interaction avec les autres facteurs, d'influence du matériau sur le facteur P (Tableau 11). Matériaux fins et grossiers se classent soit au-dessus soit au-dessous l'un de l'autre suivant les groupes. Le classement entre Pivots, Longues et Courtes, dans l'ordre décroissant de valeur, n'est pas non plus bousculé. Au bas du tableau, se trouvent sans différence significative tous les groupes de racines Longues sauf LG.g. En haut du tableau aucun des groupes de Pivots et racines Courtes ne se distingue des autres. En dehors de LM.g et LF.g tout en bas du tableau, les autres groupes de racines Longues ne diffèrent pas des groupes de racines Courtes sauf de CG.g, mais elles diffèrent des Pivots.

Type	moy	groupes
PG.f	1.160	A
PG.g	1.121	A
CG.g	1.096	A
CG.f	1.068	A B
LG.g	1.039	A B
CM.g	1.118	A B
CM.f	1.077	A B
LG.f	1.034	A B C
LM.f	0.998	B C
LF.f	0.969	B C
LM.g	0.997	C
LF.g	0.870	C

Tableau 11 : Facteur P en fonction du croisement type et de taille des racines et matériau

R, le ratio des ramifications par rapport aux variations de l'axe principal, montre des différences bien plus importantes par types racinaires que la variable P (Tableau 12).

	(Davant-D'après)/ ΣD_{ramif}		(D ² avant-D ² après)/ ΣD^2_{ramif}	
P	0.40	A	6.99	A
C	0.30	B	3.11	B
L	0.22	C	2.14	C

Tableau 12 : Ratio R des variations de diamètre et diamètre quadratique de l'axe principal par rapport au diamètre des ramifications.

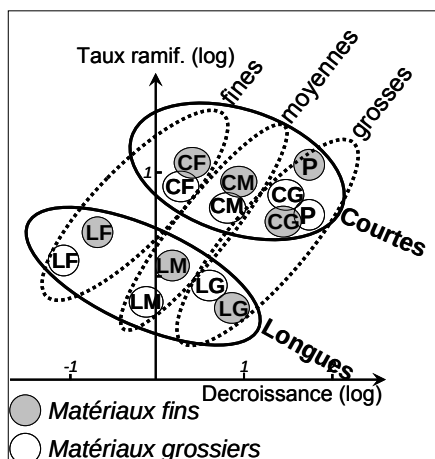
Le ratio DA/ram montre des différences significatives entre les trois types de racines, Le C se différenciant des L par un plus petit nombre de valeurs faibles, donc des ramifications plus grosses en moyenne relativement à l'axe (Tableau 13).

	moyenne	médiane	<0.5	<0.3	<0.2	<0.1
P	0.31	0.29	0.85	0.52	0.31	0.10
C	0.38	0.37	0.71	0.37	0.16	0.04
L	0.34	0.31	0.77	0.47	0.28	0.08

Tableau 13 : Ratio entre le diamètre de l'axe principal et le diamètre des ramifications, et distribution des valeurs.

Croisement des variables de décroissance et de ramification

Les types racinaires L et C ont été déterminés visuellement d'après les taux apparents de décroissance et de ramification. Il était intéressant de vérifier si cette classification avait globalement un sens. La Figure 5 croise les deux variables initialement retenues et montre le classement des trois types de racines précédemment comparés indépendamment pour l'ensemble des variables : pivots (P), racines Courtes (C) et racines Longues (L).



Les valeurs de décroissance et de ramification dans ce graphique sont en log car la distribution de ces variables est très dense pour les petites valeurs. La distinction entre L et C est nette. Par contre, les PG et les CG se confondent. Les PM, non représentés car très peu nombreux, se confondent avec le CM. L'influence de la taille de racines sur la décroissance, et dans une moindre mesure sur le taux de ramification, apparaît clairement. Ce graphique confirme la faible influence du type de matériau sur ces deux caractéristiques racinaires.

Figure 5 : Croisement des taux de décroissance et de ramification selon le type de racine, la taille et le matériau, toutes essences confondues. Chaque groupe est positionné au centre de gravité des points qu'il représente. Les différences significatives entre groupes sur chaque axe sont notées dans le Tableau 4.

Influence de l'espèce

Le robinier et le peuplier principalement, mais aussi le frêne et le saule, ont la capacité d'émettre dès le jeune âge quelques racines de grande longueur et de diamètre très supérieur à la moyenne. Celles-ci peuvent atteindre respectivement 10 cm et 5 cm de diamètre à plus de 5 et 10 m de la souche pour des arbres de 25 ans. Les racines de type LG, chez ces quatre espèces, se caractérisent par des sections à décroissance quasi-nulle sur plusieurs mètres. De telles racines n'ont pas été observées chez les chênes ni les érables. Le pin sylvestre et surtout le mélèze semblent, comme le peuplier et le robinier, émettre des racines très longues et grosses sur matériaux grossiers, très nettement différenciées des racines courtes. Ces 2 espèces n'ont pas été observées sur matériaux fins et le nombre d'individus observés est trop faible pour généraliser ces observations.

Des différences morphologiques s'observent en fonction des matériaux et de l'accès à l'eau en profondeur ou latéralement. Le contraste entre les types de racines sont renforcés dans les matériaux plus contraignants que sont les sables graveleux contenant beaucoup de galets et blocs, et relativement moins marqués sur les matériaux fins. Les LG de robinier ont un taux de décroissance moyen plus élevé dans les matériaux fins (2,72 %) que dans les matériaux grossiers (1,84 %) alors que c'est l'inverse pour les CG (respectivement 4,77 % et 6,60%). Chez le peuplier, les racines sont plus longues sur matériaux grossiers, de respectivement 53, 56 et 27% pour les P, LG et CG. Les diamètres au départ des racines y sont également plus gros à diamètre du tronc constant, respectivement 22, 31 et 40%.

L'accroissement simultané du diamètre de départ et de la longueur sur matériaux grossiers explique la relative indépendance du taux de décroissance par rapport aux matériaux. Le même phénomène s'observe chez le frêne, et, bien que de façon moins marquée, chez les chênes et érables qui semblent moins sensibles au type de matériau.

Les pivots de peuplier peuvent atteindre des dimensions très importantes même pour des arbres jeunes (3 m de long et 30 cm de diamètre à 2 m de profondeur à 25 ans) sur matériaux grossier ou drainant lorsqu'une nappe est accessible verticalement. Chez le robinier, nous n'avons jamais observé de pivot de plus de 10 cm de diamètre.

Au sein d'un système racinaire unique (un arbre sur un matériau donné), les deux types racinaires L et C sont souvent bien différenciés, ce qui tendrait à montrer qu'il s'agit de deux types fonctionnels prédéterminés. Il est fréquent d'observer des racines secondaires de type Courtes, obliques ou en forme de pivot secondaire, se développant sur une racine primaire de type Longue à différentes distances de la souche, de la ZRT jusqu'à plusieurs mètres.

DISCUSSION

Types et architecture

Les observations visuelles permettant de classer les racines en plusieurs types morphologiques semblent confirmées par l'analyse statistique sur toutes les variables utilisées sauf le type de matériau. Trois types de racines ligneuses ont été identifiés à partir de leur position dans le système racinaire et leurs caractéristiques : Pivots (P), Longues (L) et Courtes (C). Ces deux derniers sont indépendants de la typologie habituelle qui distingue les pivots, les racines obliques et les traçantes, en fonction de leur angle de développement dans le sol. Les racines L se distinguent des C par des valeurs significativement plus faibles des taux de ramification et de décroissance, du défilement, et des trois ratios décrivant les relations entre taille de l'axe principal et ramifications. La décroissance globalement plus faible des racines L a donc plusieurs explications complémentaires: les ramifications sont plus espacées, ce qui limite la perte de diamètre liées à chaque ramification, elles perdent moins de diamètre entre chaque ramification, elles perdent relativement moins de diamètre sur l'axe principal à diamètre de ramification identique, et les ramifications sont en moyenne plus petites relativement à l'axe principal.

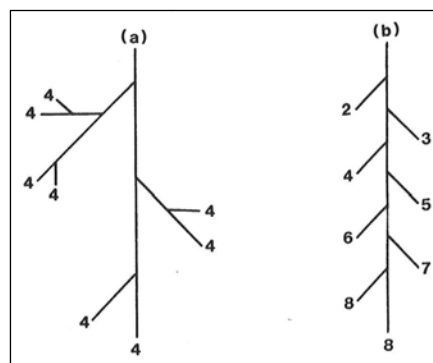
Bien que les pivots se distinguent du point de vue de leur diamètre, potentiellement plus gros que toute autre racine, de leur position dans la structure des souches et de l'angle de leurs ramifications, ils ont des caractéristiques morphologiques et architecturales semblables aux racines Courtes, dont ils ne se différencient significativement, à taille égale, que pour un nombre réduit de caractères liés aux dimensions relatives des ramifications par rapport à l'axe principal.

Dans la décroissance des racines, le défilement des segments joue un rôle moins important que la décroissance liée aux ramifications. Pour les P, C et L respectivement, le taux moyen de décroissance est de 9,2, 8,9 et 4,1 cm/m, alors que les défilements respectifs sont 3,2, 2,5 et 1,0, soit un rapport de 2,5 à 4, plus élevé chez les L que chez les P et C. Comme le taux de ramification est inférieur chez les L, ce phénomène accentue la différence avec les C et P pour la décroissance globale.

La différence architecturale entre les types de racines L et C correspond au modèles « dichotomous » et « herringbone » décrit par Fitter (2002). Ces modèles sont normalement appliqués au système racinaire entier.

Mais à plus grande échelle, au niveau des racines, la topologie est identique. Les L correspondent au modèle en arrête de poisson, et les C au modèle dichotomique (Figure 6).

Figure 6 : Représentation diagramme des modèles topologiques "dichotomique" (a) et "en arrête de poisson" (b) (Fitter 2002)



Le fait que le défilement soit sensible à la taille de la racine globalement mais moins à la taille de chaque segment montre que suivant son axe principal, une racine ne change pas de type au cours du temps. Par contre, des axes secondaires de type racine Courte ou des pivots secondaires sont fréquemment rencontrés sur les grosses racines longues jusqu'à plusieurs mètres de la souche.

Types et fonctions

Cette différenciation morphologique des racines chez les arbres, et les variations au sein de chaque type, peuvent avoir diverses origines : génétique, fonctionnelles, opportunisme, adaptation aux contraintes locales et notamment aux ressources disponibles (Atger 1991; Atger and Edelin 1994b; Zanetti et al. 2008).

Leur morphologie et leurs caractéristiques distinctes mènent à penser que les trois types identifiés pourraient remplir des fonctions différentes (Smit and Bengough 2000).

Les pivots sont généralement un élément déterminant pour l'ancrage des arbres et augmentent la résistance au chablis, en particulier pour les arbres de petite taille (Danjon et al. 2005). Nous l'avons vérifié sur les arbres arrachés par la tempête de 1999 sur les digues du Rhône : parmi les dizaines d'arbres déracinés aucun ne possédait de pivot tandis que tous les arbres que nous avons abattus et qui étaient restés debout sur les mêmes zones en étaient pourvus. Ces observations confirment les observations réalisées sur d'autres espèces après cette tempête et les tests d'arrachement (Danjon et al. 1999a : les arbres avec un bon pivot avaient une meilleure forme du tronc Danjon et al. 2008; Kokutse et al. 2006; Dupuy et al. 2005; Danjon and Fourcaud 2009). Dans les milieux que nous avons étudiés, les pivots remplissent également une fonction essentielle de recherche de l'eau en profondeur, comme le montre leur développement très dépendant de l'accès à cette ressource.

Par leur morphologie semblable, les Courtes qui sont souvent obliques ont une fonction d'ancrage. Leur dimension plus réduite et leur taux de ramification très élevé laissent penser que ces racines ont aussi un rôle d'exploitation immédiate du milieu et de nutrition. En effet, les Courtes ligneuses donnent très rapidement naissance à de nombreuses racines fines spécialisées dans le captage des ressources du sol.

Les Longues, par leur structure linéaire, permettent une prospection lointaine du milieu, notamment l'accès à des ressources distantes en eau et l'exploration pour les éléments nutritifs. Cette fonction exploratoire expliquerait qu'elles soient plus longues dans les matériaux grossiers drainants et pauvres, qui nécessitent un plus grand volume disponible pour satisfaire les besoins de l'arbre. Par leur grande longueur et fort diamètre, elles jouent aussi le rôle de hauban pour les arbres de grande dimension.

Influence de l'espèce

Pour les peupliers, robiniers, frênes et saules, nous avons observé que les plus grosses racines Longues, au diamètre stable sur plusieurs mètres, se dirigent systématiquement vers l'accès à l'eau le plus proche (direction rivière, canal ou contre-canal selon la position de l'arbre sur la digue et les berges. Nous n'avons pas observé ce type de racines chez les chênes et les érables.

Influence du matériau

Les différents types racinaires sont présents mais plus ou moins marqués selon le milieu. Les LG de grande longueur sont surtout observées dans les matériaux grossiers. On les retrouve mais moins disproportionnées dans les matériaux fins.

Les contraintes physiques dans les matériaux grossiers, notamment les nombreux cailloux et blocs empêchant la progression linéaire et la croissance en diamètre, limitent le nombre de racines qui peuvent réellement se développer. Celles qui y parviennent, notamment les plus longues, doivent remédier à leur rareté par une plus grande activité et donc des dimensions supérieures. Dans ces milieux, les grosses racines sont surtout traçantes et superficielles, accompagnées éventuellement d'un pivot, mais on observe peu de racines obliques, et celles-ci sont surtout de type Courte.

Dans les matériaux fins, généralement plus riches, moins drainants et sans contraintes physiques, le nombre de racines qui arrivent à se développer est beaucoup plus élevé. La prospection peut donc être réduite spatialement et plus partagée, ce qui explique respectivement leur relativement faible longueur et leur diamètre réduit. Dans ces milieux, les racines ont une morphologie plus homogène. Les Pivots plus courts et moins gros sur matériaux limoneux peuvent aussi s'expliquer par un accès à l'eau plus aisé et une disponibilité prolongée de celle-ci grâce à des remontées capillaires et une meilleure capacité de rétention. En l'absence de contraintes physiques et/ou

chimiques, les racines se développent donc de façon relativement régulière dans toutes les directions (Foussadier 2003).

Nous avons par ailleurs noté que lorsqu'une digue possède un noyau d'argile ou de limon compacté mécaniquement, aucune racine ne s'y développe. Ce compactage constitue une autre forme de contrainte physique (Unger and Kaspar 1994).

Les souches sur matériaux fins présentent des structures fasciculées avec un nombre élevé de racines moyennes et fines suffisant à assurer l'alimentation de l'arbre dans des matériaux propices. Ces tendances ne sont pas observables sur matériaux grossiers (Figure 5) où les systèmes racinaires ont une structure beaucoup moins homogène et moins dense. Les grosses racines, et notamment les Courtes, conservent un taux de ramification élevé dans les gros diamètres sur ces matériaux. On pourrait en déduire que la survie des racines, ayant réussi à se développer dans le jeune âge, est essentielle pour assurer une prospection maximale du milieu en profitant de toutes les opportunités (Atger and Edelin 1994b).

Les traçantes Courtes sont généralement émises à partir des pivots ou directement de la souche, mais également de façon irrégulière à partir des traçantes longues. Leur développement pourrait correspondre à des zones ponctuellement plus fertiles ou plus favorables physiquement. Nous avons notamment observé de telles racines courtes colonisant des lentilles plus sableuses dans des noyaux limoneux compactés. Sur les vieux arbres, on peut également les observer à la base du collet, sur les zones de départ des charpentières. Elles correspondraient dans ce cas, au phénomène de réitération, c'est-à-dire à l'apparition tardive (néoformation) de nouvelles générations de racines (Atger 1991) pour la ré-exploration autour de la souche et le long du tracé des longues, d'un milieu précédemment exploré par les longues.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

A la lumière des nombreuses excavations et mesures effectuées in situ depuis 2003, nous constatons que les racines ligneuses peuvent être classées en plusieurs types morphologiques distincts chez différentes espèces d'arbres. Ces types restent reconnaissables quels que soient les propriétés des milieux que nous avons étudiés (type de matériaux, conditions hydriques...) qui influencent la structure globale des systèmes racinaires.

S'il semble clair que certaines racines traçantes longues et grosses se sont développées de façon opportuniste en accédant à une ressource en eau régulière éloignée de la souche, la différenciation entre les racines courtes, très ramifiées et les racines longues, peu ramifiées à partir du plus jeune âge n'est pas élucidée. L'analyse typologique de systèmes racinaires de tous âges, et notamment entre 1 et 10 ans, fait défaut. Elle permettrait de savoir si le type d'une racine est prédéterminé (la typologie serait d'origine génétique), ou, s'il se détermine de façon opportuniste, à partir de quel âge et dans quelles conditions de contraintes il se fixe (Atger 1992).

Il est donc nécessaire d'une part de revisiter les jeux de données existant pour d'autres études à la lumière de cette typologie, et d'autre part de poursuivre les recherches sur d'autres matériaux et dans d'autres contextes.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par le Cemagref, la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, et par les gestionnaires d'ouvrages (EDF, CNR, AD Isère, DDT de la Nièvre, SMAVD) qui ont mis à disposition d'importants moyens techniques et matériels pour la réalisation des chantiers d'extraction des systèmes racinaires. Les auteurs tiennent à remercier les collègues et techniciens qui ont aidé à l'acquisition des données pendant les campagnes de terrain, et notamment Willy Martin, Roland Estève, Christian Ripert, Olivier Chandioix et Pierre Jean Moundy.

BIBLIOGRAPHIE

- Abernethy B and Rutherford I D (2001) The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. *Hydrological Processes* 15: 36-79. 10.1002/hyp.152
- Abernethy B and Rutherford I D (2000a) Does the weight of riparian trees destabilize riverbanks? *Regulated rivers : research & management* 16: 565-576.
- Abernethy B and Rutherford I D (2000b) The effect of riparian tree roots on the mass-stability of riverbanks. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 921-937.
- Atger C (1991) L'architecture racinaire est-elle influencée par le milieu? *L'arbre, biologie et développement* (hs):71-84
- Atger C (1992) Essai sur l'architecture racinaire des arbres. Doctoral dissertation, Université de Montpellier II
- Atger C, Edelin C (1994a) Premières données sur l'architecture comparée des systèmes racinaires et caulinaires. *Can J Bot* 72:963-975
- Atger C, Edelin C (1994b) Stratégie d'occupation du milieu souterrain par les systèmes racinaires des arbres. *Ecologie* 49:343-356

- Barthélémy D and Caraglio Y (2007) Plant Architecture: A Dynamic, Multilevel and Comprehensive Approach to Plant Form, Structure and Ontogeny. *Annals of Botany* 99: 375-407.
- Berry A M (2009) Trees and Levees: How and Where Do Tree Roots Grow? *In* United States Society on Dams, USSD Workshop on Levees, Sacramento, California October 14. Ed US-ARMY
- Charles-Dominique T, Mangenet T, Rey H, Jourdan C and Edelin C (2009) Architectural analysis of root system of sexually vs. vegetatively propagated yam (*Dioscorea rotundata* Poir.), a tuber monocot. *Plant and Soil* 317: 61-77.
- Collet C, Löf M and Pagès L (2006) Root system development of oak seedlings analysed using an architectural model. Effects of competition with grass. *Plant and Soil* 279: 367-383.
- Corcoran M (2009) The Effects of Woody Vegetation on Levee Performance. *In* US Society of Dams, USSD Workshop on Levees, Sacramento, California October. Ed US-ARMY
- Daly F, Chapital L, Personne C (2005) État des lieux patrimonial des digues de canaux de navigation en France. *Ing EAT N° spécial*:23-30
- Danjon F, Bert, 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, 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
- Danjon F, Drexhage M, Fourcaud T and Bert D (2005) Root architecture and wind-firmness of mature Pinus pinaster. *New Phytologist* 168: 387-400.
- Danjon F and 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* 1-34. doi:10.1007/s11104-007-9470-7
- Danjon F, Fourcaud T (2009) L'arbre et son enracinement. *Innov Agro* 6:17-37
- Drexhage M, Chauvière M, Colin F, Nielsen C (1999) Development of structural root architecture and allometry of quercus petraea. *Can J For Res* 29:600-608
- Drexhage M, Gruber F (1998) Architecture of the skeletal root system of 40-year-old picea abies on strongly acidified soils in the harz mountains -germany. *Can J For Res* 28:13-22
- Dupuy L (2003) Modélisation de l'ancrage racinaire des arbres forestiers. Université Bordeaux 1,
- Dupuy L, Fourcaud T, Stokes A (2005) A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension. *Eur J Soil Sci* 56:319-327
- Fitter A (2002) Characteristics and functions of root systems. *In*: Waisel Y, Eshel A (eds) *Plant roots - the hidden half*, vol 10. Dekker, New York, pp 15-32
- Fitter A, Stickland T (1991) Architectural analysis of plant root systems 2. Influence of nutrient supply on architecture in contrasting plant species. *New Phytol* 118:383-389
- Foussadier R (2003) Les systèmes racinaires des arbres de la ripisylve : Effets des contraintes physiques et exemples. *In*: IDF (ed) *Les forêts riveraines des cours d'eau, écologie, fonctions et gestion*. Paris, pp 124-133
- Godin, Costes, Sinoquet (1999) A method for describing plant architecture which integrates topology and geometry. *Ann Bot* 84:343-357
- Godin C, Costes E, Caraglio Y (1997a) Exploring plant topological structure with the amapmod software : An outline. *Silva Fenn* 31 (3):355-366
- Godin C, Guédon Y, Costes E, Caraglio Y (1997b) Measuring and analysing plants with the amapmod software. *Adv Comput Life Sci*:53-84
- Haselsteiner R (2007) The Design of Dykes with Woody vegetation - German Standards, Experiences and Concepts. The vegetation Challenge: A scientific and engineering examination of managing vegetation along California's Central Valley levees that protect urban and rural areas from devastating floods. *In* Levee Vegetation Symposium, Sacramento (USA) 28-29 August 2007
- Jourdan C and Rey H (1997) Modelling and simulation of the architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system 1. the model. *Plant and Soil* 190: 217-233.
- Kalliokoski T, Sievänen R and Nygren P (2010) Tree roots as self-similar branching structures: axis differentiation and segment tapering in coarse roots of three boreal forest tree species. *Trees Structure and Functions* 24: 219-236.
- Kokutse N, Fourcaud T, Kokou K, Neglo K, Lac P (2006) 3d numerical modelling and analysis of the influence of forest structure on hill slopes stability. *In*: Springer (ed) *Slope stability and erosion control: Ecotechnological solutions*. pp 561-567
- Khuder H, Danjon F, Stokes A and Fourcaud T (2007) Interactions between static and dynamic loading and their influence on acclimative growth in young trees. *In* International Conference on 'Wind and Trees, Vancouver, British Columbia, Canada.
- 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. *Ingénierie EAT N°spécial*:15-21
- Mériaux P, Vennetier M, Aigouy S, Hoonakker M and Zylberblat M (2006) Diagnosis and management of plant growth on embankment dams and dykes. *In* Commission Internationale des Grands Barrages, Barcelona. pp 1-20.

- Mériaux P and Royet P (2007) Surveillance, maintenance and diagnosis of flood protection dikes - A practical handbook for owners and operators. Quae Cemagref. 162 p.
- Nicoll B C, Achim A, Mochan S and Gardiner B A (2005) Does steep terrain influence tree stability? A field investigation. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 2360-2367.
- Nicoll B C, Berthier S, Achim A, Gouskou K, Danjon F and Beek L P H v (2006) The architecture of *Picea sitchensis* structural root systems on horizontal and sloping terrain. *Trees Structure and Functions* 20: 701-712.
- Nilaweera N, Nutalaya P (1999) Role of tree roots in slope stabilisation. *Bull Engineer Geol Envir* 57:337-342
- Norme GTR NFP 11-300 : Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais (09/1992).
- Norris J, Greenwood J Root reinforcement on unstable slopes in northern greece and central italy. In: *An International Conference on Problematic Soils*, Nottingham, United Kingdom, 2003. p 8
- Nygren P, Lu M and Ozier-Lafontaine H (2009) Effects of turnover and internal variability of tree root systems on modelling coarse root architecture: comparing simulations for young *Populus deltoides* with field data. *Canadian Journal of Forest Research* 39: 97-108.
- Pinhas M (2005) Confortement de digues étroites et boisées le cas des digues de l'isère Ingénieries EAT N° spécial:179-184
- Pollen N (Haselsteiner et al.) Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture. *CATENA* 69:197-205
- R_Development_Core_Team, 2004. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing.
- Reubens B, Poesen J, Danjon F, Geudens G and 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* 21: 385-402.
- Soethe N, Lehmann J and Engels C (2007) Root tapering between branching points should be included in fractal root system analysis. *Ecological Modelling* 207: 363-366.
- Smit AL, Bengough AG (2000) Root characteristics : Why and what to measure. In: Smit AL, Bengough AG (eds) *Root methods : A hand book*, vol 1. Springer, pp 1-20
- Unger PW, Kaspar TC (1994) Soil compaction and root growth: A review. *Agron J* 86:759-766.
- Van-Noordwijk M and Purnomosidhi R (1995) Root architecture in relation to tree-soil-crop interactions and shoot pruning in agroforestry. *Agroforestry Systems* 30: 161-173.
- Vennetier M, Ripert C, Chandioux O, Mériaux P, Doirat G (2005) Gestion de la végétation des digues et berges sous contrainte de sécurité. Ing EAT N° Spécial:3-14
- Vercambre G, Pages L, Doussan C, Habib R (2003) Architectural analysis and synthesis of the plum tree root system in an orchard using a quantitative modelling approach. *Plant Soil* 251:1-11
- Zanetti C, Vennetier M, Mériaux P, Royet P, Dufour S and Provansal M (2008) L'enracinement des arbres dans les digues en remblai : étude des systèmes racinaires et impacts sur la sécurité des ouvrages. Ingénieries E A T 53: 49-67.

2.3. Conclusions de l'article et perspectives

Trois types de racines ligneuses ont été identifiés à partir de leur morphologie, de leurs caractéristiques de décroissance et de ramification : les pivots (P), les racines longues (L) et les racines courtes (C). Les racines Courtes se caractérisent par une décroissance plus rapide en diamètre et un nombre de ramifications plus élevé que les racines Longues. Bien que les pivots se distinguent du point de vue de leur diamètre, potentiellement plus gros que toute autre racine et de leur position dans la structure des souches, ils ont des caractéristiques morphologiques et architecturales semblables aux grosses racines courtes.

Les origines de cette différenciation morphologique chez les racines des arbres, et les variations au sein de chaque type, restent énigmatiques. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées :

- Les types de racines sont-ils prédéterminés génétiquement (une racine est-elle prédestinée dès sa naissance à un type de croissance), Une telle différenciation initiale existe chez certains arbres avec des rameaux courts et longs, destinées pour les premiers à la reproduction, pour les autres à l'exploration de l'espace ?
- ou s'agit-il d'une adaptation précoce de chaque racine aux contraintes locales initiales et aux opportunités, le type se maintenant une fois initié ?
- ou s'agit-il d'un développement fonctionnel, un équilibre entre les différents types s'établissant en fonction des contraintes et ressources du milieu et des besoins de l'arbre ?

Il paraît assez évident que le développement d'un gros pivot, outre un certain déterminisme génétique, est fortement dicté par les contraintes et les ressources du milieu, en particulier la possibilité de trouver de l'eau (et éventuellement des éléments nutritifs) en profondeur. Pour les autres racines, courtes et longues, il est difficile de répondre avec certitude à ces questions, et la différenciation, qui est plus marquée suivant les matériaux, pourrait avoir des origines multiples.

Cette typologie doit être vérifiée à partir d'autres jeux de données acquis par des auteurs travaillant sur l'architecture racinaire et ayant mesuré la globalité des racines présentes sur les souches. En effet, nous n'avons que rarement, et seulement pour des systèmes de petites dimensions, mesuré l'intégralité des racines d'un arbre. Il serait aussi intéressant de revisiter certaines études de systèmes racinaires jeunes, destinées à évaluer le comportement racinaire à différents traitements ou stress en pépinière, en conteneurs ou en forêt (irrigation, fertilisation, densités, types de substrats, ...), et pour lesquels des images ont été acquises et numérisées afin de quantifier les paramètres racinaires (nombres, longueurs diamètres, volume,...). En effet, il nous a semblé, en arrachant de jeunes arbres et notamment des jeunes chênes de moins de 10 ou 20 ans au cours de la préparation du terrain autour des vieux arbres, qu'une différenciation des types était déjà bien visible. Un travail complémentaire est nécessaire pour vérifier cette hypothèse à différents âges depuis la naissance et pour toutes les espèces.

Du point de vue de la sécurité des ouvrages, certaines espèces développent des racines qui sont potentiellement dangereuses. C'est le cas des racines Longues de robinier et de peuplier qui conservent un diamètre important (> à 5 cm) sur plusieurs mètres et qui peuvent ainsi traverser une partie ou la totalité de l'ouvrage selon la dimension de ce dernier. Les Pivots de peuplier et de saule sont également problématiques de part leurs dimensions très importantes (> à 50 cm de diamètre au départ, atteignant 3 m de profondeur).

Afin d'appréhender la mise en place et les vitesses de développement des racines dans les digues, nous avons étudié la croissance des racines, à l'échelle intra-racinaire, par le biais de la dendrologie.

Chapitre 3

Croissance racinaire

SOMMAIRE

Préambule	107
3.1. Présentation de l'article III	107
3.2. Rappels des caractéristiques dendrologiques du bois	107
3.3. Article III: Caractérisation de la croissance racinaire d'essences ligneuses implantées sur des digues fluviales	111
3.4. Conclusions de l'article.....	119
3.5. Comparaison anatomique du bois de racines sur digues et sur sols de montagne	119
3.6. Perspectives.....	121

Statut de l'article III

Accepté le 18/05/10 pour publication dans la revue *Collection EDYTEM – N°11, 2010.*

PREAMBULE

L'étude du développement des systèmes racinaires et de la vitesse de croissance des racines dans les digues était l'un des premiers thèmes de recherche identifié au commencement de la thèse.

La modélisation dynamique du développement des systèmes avait été envisagée. Conséquemment à la rencontre de Christian Dupraz de l'INRA Montpellier (UMR SYSTEM), nous avons constaté que ces modèles dynamiques sont issus d'une acquisition de données très précise, à l'échelle des voxels (1 dm^3) où les paramètres d'entrée /sortie sont contrôlés (teneur en eau et en azote / biomasse racinaire). Comme pour les modèles réduits, la mise au point des modèles dynamiques concernant la croissance des racines nécessite des conditions d'observation et de suivi proches de celles en laboratoire. Il s'est avéré que cette méthode n'était pas adaptée à nos travaux, qui consistent en l'arrachage d'un grand nombre d'arbres dans des délais restreints (afin de garantir la sécurité des ouvrages et de minimiser le coût élevé des engins mécaniques). De plus, nos analyses portant sur le milieu environnant les systèmes racinaires sont effectuées à l'échelle du système entier (analyse granulométrique et teneur en matière organique réalisées sur 1 à 3 prélèvements par souche).

La comparaison des arbres de mêmes espèces à différents stades de développement n'a été effectuée que sur très peu d'individus (2 à 4 par espèce) et n'a donc pas permis l'obtention de résultats exploitables par les modèles dynamiques car nous nous sommes essentiellement intéressés aux systèmes racinaires d'arbres matures, de dimensions importantes, dangereux pour les ouvrages.

Dans le cadre de nos travaux, la croissance des racines a donc été appréhendée par l'approche dendrologique qui consiste en l'analyse des cernes de croissance annuels du bois. L'objectif de cette étude préliminaire était dans un premier temps, d'évaluer l'existence d'une relation entre le diamètre des racines et leur âge, puis, dans un second temps, de caractériser la vitesse de croissance en fonction des espèces et des types racinaires.

3.1. Présentation de l'article III

C'est lors de la découpe des échantillons de racines sur le terrain après excavation des souches qu'a été remarquée la présence de cernes de croissance visibles à l'œil nu, et cela même sur les racines ligneuses de faible diamètre ($< 2 \text{ cm}$).

Après l'observation de quelques échantillons de racines avec Frédéric Guibal, chargé de recherche CNRS à l'IMEP d'Aix-en-Provence, le dénombrement des cernes sur bois racinaire a été envisagé. L'objectif de cette étude était, dans un premier temps, de vérifier l'existence d'une relation entre le diamètre et l'âge des racines et dans un second temps d'évaluer la vitesse de croissance des racines en fonction de leur type (Longue, Courte et Pivot) et des espèces.

Les premiers résultats sont présentés dans l'article III ci-après.

3.2. Rappels des caractéristiques dendrologiques du bois

Dans la plupart des régions du monde, le bois présente des cernes annuels de croissance avec une alternance de bandes plus claires (bois initial) et plus sombres (bois final) se succédant du cœur de l'arbre vers l'extérieur. Ces alternances marquent des variations dans la vitesse de

croissance de l'arbre et dans l'anatomie du bois. De larges cernes indiquent une croissance rapide et donc des conditions favorables de croissance. Des cernes étroits révèlent des conditions d'environnement limitantes (sols pauvres, climat froid ou sec avec courte saison de croissance), une forte compétition entre arbres voisins (peuplement dense) ou un âge élevé (les arbres poussent généralement plus vite dans leur jeunesse). En fonction des variations climatiques interannuelles, des agressions que subit l'arbre (attaques de parasites, pollution, casses de branches par la neige ou le vent, incendies, inondations...), et des changements d'environnement (compétition avec des arbres voisins, variations de nappes phréatiques, ...) la largeur des cernes, les proportions de bois initial et final dans le cerne et la densité du bois varient parfois fortement d'une année à l'autre. Les années ou les périodes climatiquement les plus et les moins favorables ainsi que les grandes perturbations (gels exceptionnels, canicules, fortes attaques de parasites) sont généralement communes à tous les arbres d'un peuplement et parfois d'une région entière pour une espèce donnée. Elles donnent des cernes ou séries de cernes caractéristiques par leur largeur et leur anatomie (ou une absence de cerne certaines années) dont la succession permet de dater les échantillons de bois de façon absolue sur de très longues périodes (dendrochronologie). Rétrospectivement, l'étude des cernes donne des indications sur les climats du passé et l'histoire des peuplements (éclaircies, incendies, ...).

La croissance annuelle de l'arbre dépend des conditions climatiques (Krause and Eckstein 1994). Dans les climats tempérés de basse altitude, pluies et température contrôlent la croissance : il y a généralement un accroissement assez rapide au printemps, moindre en été et automne et inexistant en hiver. En région méditerranéenne, la croissance démarre parfois dès la fin de l'hiver, elle s'interrompt en début d'été à cause de la sécheresse, et reprend en automne si les pluies sont suffisamment précoces et abondantes. Un deuxième cerne, plus ou moins complet, peut être formé dans les cas extrêmes (faux cerne). En montagne, la croissance est plutôt contrôlée par le froid : la croissance est maximale en fin de printemps et début d'été et ralentit en fin d'été et automne pour s'interrompre longtemps dès la fin de l'automne. Dans les régions tropicales chaudes, c'est la pluie qui est le facteur limitant principal et la croissance est plus ou moins continue tant que l'eau est disponible ; quand des cernes sont observés, ils marquent l'alternance de saisons des pluies (bois initial) et saisons sèches (bois final) où, en absence de telles saisons, des périodes de chute des feuilles (pas forcément annuelles) pour les espèces décidues.

Le bois initial (Figure III.Ch3.1) est, comme son nom l'indique, la partie du cerne qui s'est formée pendant la première partie de la période de croissance. Les trachéides à membrane fine dans les bois résineux, et les veines tubulaires ouvertes dans les bois feuillus, composent l'essentiel du bois initial afin de faciliter la circulation rapide de la sève. Le bois initial apparaît généralement comme une large bande de bois plus claire dans chaque cerne annuel de croissance. Il est léger et présente une faible résistance mécanique.

Le bois final (Figure III.Ch3.1) se développe quand la croissance ralentit. Il produit des cellules à membrane plus épaisses, formant un bois plus dense, plus foncé, moins apte à faire circuler la sève mais utile pour la rigidité du bois et la résistance de l'arbre aux contraintes mécaniques.

Les bois de feuillus, à zones poreuses, comme le chêne ou le frêne, présentent des vaisseaux clairement définis dans le bois de printemps, et un tissu de cellules et de fibres denses dans le bois d'été. Les bois à pores diffus comme le peuplier, présentent des fibres et des vaisseaux uniformément répartis (Figure III.Ch3.2).

Bien que la lecture soit plus aisée sur le bois de la partie aérienne de l'arbre, les cernes de croissance, avec la distinction bois initial et final, sont clairement identifiables sur nos échantillons de racines, qu'il s'agisse de conifères ou de feuillus.

Le bois d'aubier est de couleur claire et généralement reconnaissable par le contraste qu'il offre avec le bois de cœur (ou duramen) plus foncé. Mais cette différence de couleur est peu accentuée sur des bois de couleur claire, notamment les résineux.

Le bois de cœur étant la partie inférieure de l'arbre, qui mûrit et se forme à partir d'ancien bois d'aubier, il ne participe aucunement à sa croissance. Ces cellules mortes peuvent être bouchées par un matériau organique qui, par la présence de substances chimiques appelées constituants secondaires, provoque le changement de couleur des parois cellulaires. Cette substance est à l'origine des couleurs riches que l'on trouve dans bon nombre de feuillus (merisier, noyer,...). Ces constituants secondaires assurent une certaine protection contre les champignons et les insectes.

Certains auteurs avancent qu'il n'y a pas de bois de cœur dans les racines (Drenou et al., 2006). La différence entre l'aubier et le duramen n'est pas toujours clairement identifiable sur le bois racinaire, mais on observe souvent une différence de couleur ou de résistance à la dégradation (Figure III.Ch3.3) sur les racines de structure entre le bois interne et périphérique.

Nos échantillons de racines ont été analysés dans un laps de temps restreint. D'autres analyses pourraient être effectuées afin de vérifier certaines hypothèses telles que l'existence d'un bois de cœur par identification du processus de duraminisation.

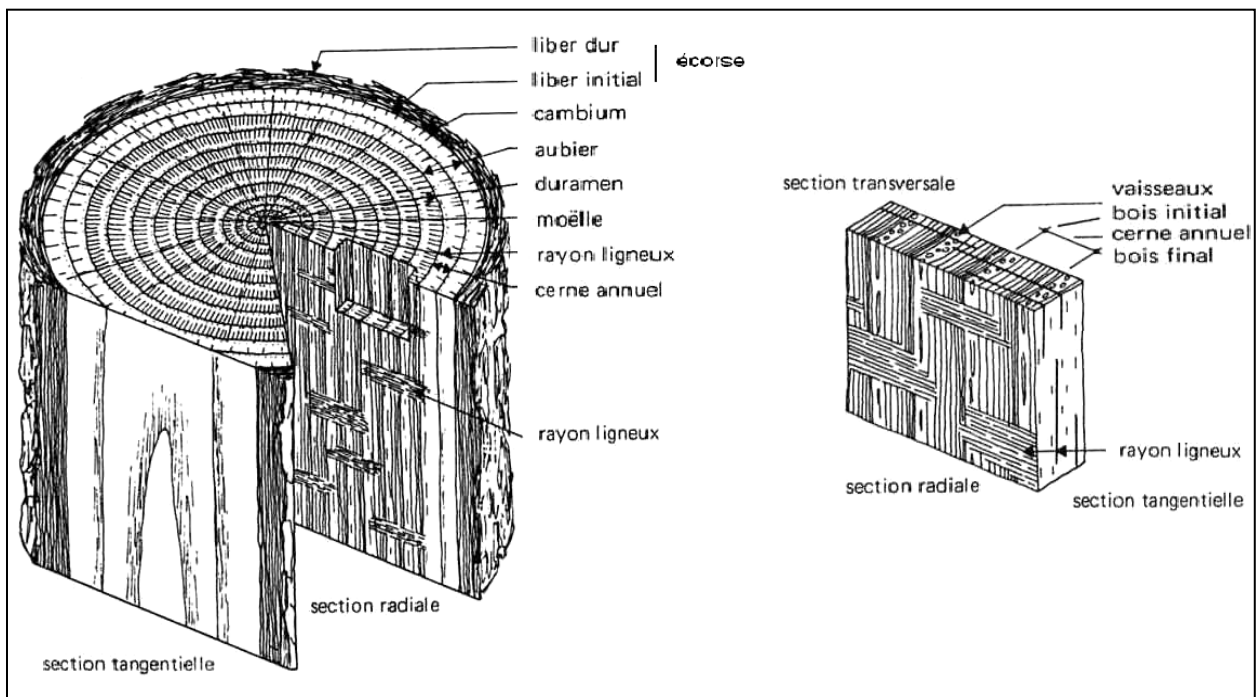


Figure III.Ch3.1 : Caractéristiques macroscopique du bois (Schweingruber 1982)

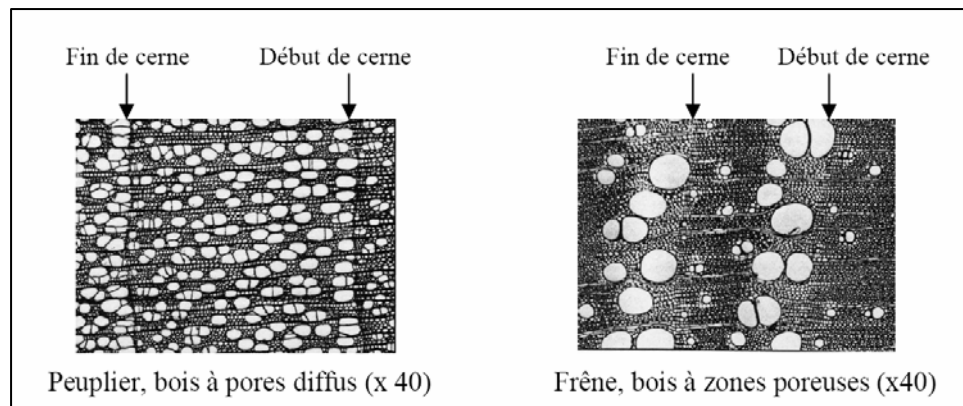


Figure III.Ch3.2 : Caractéristiques microscopique du bois de feuillus (Schweingruber 1982)



Figure III.Ch3.3 : Différence de résistance à la dégradation du bois entre les parties interne, périphérique et l'écorce

3.3. Article III: Caractérisation de la croissance racinaire d'essences ligneuses implantées sur des digues fluviales

CARACTÉRISATION DE LA CROISSANCE RACINAIRE D'ESSENCES LIGNEUSES IMPLANTÉES SUR DES DIGUES FLUVIALES

GROWTH CHARACTERIZATION OF WOODY ROOTS ON RIVER DIKES

CAROLINE ZANETTI^{1,4}, FRÉDÉRIC GUIBAL², MAXIME BRUGIER¹,
MICHEL VENNETIER³, PATRICE MÉRIAUX¹, MIREILLE PROVANSAL⁴

¹ Cemagref, UR Ouvrages hydrauliques et hydrologie, 3275 route de Cézanne, CS 40061, F 13182 Aix-en-Provence cedex 5.

² IMEP - UMR 6116 - CNRS, Europôle Méditerranéen de l'Arbois, Bat. Villemain, BP 80, F 13545 Aix-en-Provence cedex 4.

³ Cemagref, UR Ecosystèmes méditerranéens et risques, 3275 route de Cézanne, CS 40061, F 13182 Aix-en-Provence, cedex 5.

⁴ CEREGE, Europôle de l'Arbois, BP 80, F 13545 Aix-en-Provence cedex 4.

Contact : caroline.zanetti@cemagref.fr

RÉSUMÉ

Le développement des arbres sur les digues en terre est peu souhaitable du point de vue de la sécurité des ouvrages. Au-delà d'une certaine dimension, dépendante de l'âge des arbres, de l'espèce et du milieu, les systèmes racinaires génèrent des risques d'érosion qui peuvent être importants sur les digues anciennes et densément boisées. Outre la sécurité, la gestion et l'entretien de la végétation arborescente implantée sur les digues nécessitent la prise en compte de plusieurs autres paramètres, tels que les fonctions écologiques et sociales des boisements rivulaires. L'objectif de cette étude est donc de déterminer des seuils critiques basés sur les dimensions des racines qui permettront d'affiner les recommandations de gestion. Ces dimensions dépendant en partie de l'âge, la relation entre le diamètre des racines et leur âge a été évaluée, complétée par l'analyse de la vitesse de croissance des racines en fonction des espèces végétales, des individus, de l'âge des souches, des matériaux constitutifs du remblai et des modalités de gestion. Les échantillons de racines ont été prélevés sur des souches de feuillus extraites des levées de la Loire ainsi que sur des souches de résineux implantées sur une digue de retenue dans les Alpes Maritimes. Les espèces étudiées sont le peuplier (*Populus hybrida*), le robinier (*Robinia pseudoacacia*), le chêne pubescent (*Quercus pubescens*), l'érable negundo (*Acer negundo*), le mélèze (*Larix decidua*) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*). La vitesse de croissance des racines est très dépendante de l'espèce. Le ratio âge/diamètre des grosses racines d'un arbre semble proportionnel au ratio âge/diamètre du tronc. Cependant, de nombreux paramètres influencent ce ratio, et des travaux complémentaires sont indispensables pour aboutir à un système opérationnel fiable d'aide à la décision.

MOTS-CLÉS : SÉCURITÉ DES DIGUES EN TERRE, RACINE LIGNEUSE, RELATION ÂGE/DIAMÈTRE.

ABSTRACT

Tree growth on earth dikes generates safety problems and reduces embankments durability. Tree root systems create erosion risks, particularly internal erosion phenomena which can be destructive on old wooded dikes. Besides the safety, management and maintenance of woody vegetation on dikes require the consideration of several other parameters, such as ecological and social functions of the riparian forest. The objectives of this study are to determine critical thresholds based on root dimensions which allow to specify management rules. These dimensions depending of age, the relation between root diameter and their age was estimated, and completed by growth speed analyses in function of species, stumps age, dike materials and management modalities.

Root samples were taken from broadleaved-trees stumps extracted from Loire levee and from conifer trees stumps implanted on a mountain river dike in the Alpes-Maritimes. The studied species are poplar (*Populus hybrida*), locust (*Robinia pseudolocust* tree), oak (*Quercus pubescens*), negundo maple (*Acer negundo*), larch (*Larix decidua*) and scots pine (*Pinus sylvestris*). Roots growth speed is very dependent of the species. The ratio age/diameter of big roots seems proportional to the ratio age/diameter of tree trunk. However, numerous parameters influence this ratio, and additional works are indispensable to succeed in a reliable operational system of decision-making support.

KEYWORDS: EARTH DIKE SAFETY, WOODY ROOT, AGE/DIAMETER RELATIONSHIP.

INTRODUCTION

Le système racinaire des arbres est une variable encore mal connue, notamment au niveau des risques qu'elle fait encourir aux ouvrages hydrauliques en terre. Par précaution, les recommandations habituelles sont d'empêcher l'installation des arbres sur les digues et les barrages. La nécessité d'intégration paysagère, la fonction d'accueil du public jouée par certaines digues, parfois la volonté de stabiliser les talus ou encore un simple manque d'entretien ont conduit au développement des arbres sur ou à proximité de ces ouvrages. De telles situations engendrent une interrogation sur les modalités de gestion des digues déjà boisées (Vennetier *et al.*, 2005).

La végétation sur les digues gêne la surveillance visuelle et la détection de désordres éventuels sur les talus ; elle favorise la présence d'animaux fouisseurs qui creusent leurs terriers dans les remblais et les systèmes racinaires sont un facteur de fragilisation à court et moyen terme (Mériaux *et al.*, 2007 ; Mériaux *et al.*, 2006).

L'enracinement des arbres génère deux types de risques pour les digues (Zanetti, 2007) :

- premièrement, l'érosion interne : principale cause de rupture des ouvrages en remblai, ce risque est aggravé par la présence des systèmes racinaires qui constituent des zones d'hétérogénéités 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 lorsque la digue en est dotée. Il faut cependant noter qu'à contrario ces racines peuvent améliorer localement et temporairement la cohésion des matériaux. Ceci n'est généralement pas pris en compte dans la gestion actuelle de la végétation, étant donné que la stabilité des talus est calculée à la construction des ouvrages. Cependant, des plantations ont été réalisées dans le passé sur de nombreuses digues et des talus de barrages dans

l'objectif affiché de lutte contre l'érosion et de stabilisation des pentes. Après pourrissement, les racines génèrent un risque de renard hydraulique du fait de la création de conduits, favorisant les circulations d'eau et pouvant conduire à la formation de brèche par effondrement ;

- deuxièmement, l'érosion externe : l'arrachement d'un arbre sur le talus côté rivière, peut induire une déstabilisation de l'ouvrage suite à l'ablation, par le système racinaire, d'une loupe de terre plus ou moins importante. Ces hétérogénéités de surface favorisent, lors des crues, le développement de courants tourbillonnaires qui sont à l'origine d'affouillements pouvant déstabiliser le talus de l'ouvrage. Ce type de phénomène se rencontre sur les digues de cours d'eau soumises à une forte vitesse de courant. Enfin, l'arrachement d'un arbre en crête de digue peut diminuer la hauteur de celle-ci et être l'origine d'une surverse.

L'importance du risque dépend de la structure de l'enracinement (type d'architecture, volume, nombre, longueur et diamètre des racines), des dimensions de l'ouvrage et des propriétés des matériaux constituant le corps de digue, dans le cas de l'érosion interne et de la dimension de la partie aérienne de l'arbre (prise au vent) pour ce qui est de l'érosion externe (Zanetti *et al.*, 2008).

L'objectif de cette étude préliminaire est de déterminer s'il existe des seuils critiques en termes d'âge des souches, en se basant sur les dimensions des racines. Il s'agit, dans un premier temps, d'évaluer l'existence d'une relation entre le diamètre des racines et leur âge, puis de caractériser la vitesse de croissance en fonction des espèces et des types racinaires. Ces seuils doivent aussi prendre en compte le type de matériaux constitutifs des ouvrages, dont dépend le niveau de risque. À plus long terme, on cherche à constituer un outil d'aide à la décision pour la gestion de la végétation arborescente sur les digues.

I - MÉTHODOLOGIE

1 - Présentation des sites d'études

a - Cosne-sur-Loire

Le premier site se localise sur une levée de la Loire à Léré, bourg à proximité de Cosne-sur-Loire dans la Nièvre. Il s'agit d'un ouvrage créé initialement pour protéger les terres agricoles. Confortées après chaque grande crue historique, ces digues protègent aujourd'hui les zones urbaines contre les hautes eaux de la Loire. Elles sont constituées de matériaux extraits de la rivière, essentiellement sableux sur la zone d'étude.

Ce secteur est soumis à un climat océanique dégradé avec une température annuelle moyenne de 10,5 °C (minima mensuel de 5,5 °C et maxima mensuel de 15,5 °C). La pluviométrie annuelle est de 800 mm. Ce site, en bordure de rivière, offre des conditions de croissance très favorables à la végétation.

Les espèces que nous avons étudiées sont le chêne pubescent (*Quercus pubescens* Willd.), l'érable négundo (*Acer negundo* L.), le robinier faux-acacia (*Robinia pseudo-acacia* L.) et le peuplier hybride (*Populus hybrida*). Cinq souches par espèce ont été excavées. Les systèmes racinaires avaient une morphologie fasciculée, avec une grande densité de racines.

Les matériaux sableux peu contraignants sont propices au développement d'une structure racinaire homogène (Figure 1).



Figure 1 - Système racinaire fasciculé de Robinier, extrait de la digue de Léré.

b - Castérino

Le second site se localise sur une digue de fermeture de barrage à Castérino, dans le Parc National du Mercantour, dans la haute vallée de la Roya (Alpes-Maritimes). Cet ouvrage assure les mêmes fonctions qu'une digue de protection contre les crues. Le remblai est hétérogène, constitué de blocs calcaires entourés d'une matrice limono-sableuse.

Ce secteur est soumis à un climat montagnard aux influences méditerranéennes, avec des hivers froids et des étés chauds. La température annuelle moyenne est de 7 °C (minima mensuel de -4,5 °C et maxima mensuel de 21 °C). Les précipitations sont abondantes (plus de 1100 mm/an) et particulièrement violentes. Les arbres implantés sur la digue disposent d'un sol profond et de conditions de croissance favorables.

Les espèces étudiées sont le mélèze (*Larix decidua* Mill.) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.). Huit souches au total ont été excavées. Les systèmes racinaires avaient une morphologie mixte (composés d'un système traçant dense et de plusieurs pivots importants). Les matériaux grossiers contraignants induisent le développement de structures racinaires complexes (Figure 2).

2 - Plan d'échantillonnage et préparation des échantillons

Les arbres étudiés avaient entre 15 et 75 ans. Les échantillons de racines ont été prélevés sur les souches de feuillus extraites des levées de la Loire et sur les souches de résineux implantées sur la digue de Castérino. Au total, 330 échantillons ont été prélevés, 190 pour étudier la relation âge/diamètre et 140 pour analyser la croissance des racines en fonction des types

racinaires (Figure 3). Les racines sont séparées en 3 groupes (Zanetti *et al.*, 2008) : les longues (majoritairement superficielles et peu ramifiées, Figures 4 et 5 b), les courtes (généralement pénétrantes et très ramifiées, Figures 5 a et 5 b) et les pivots (verticaux, avec un nombre de ramifications variable, Figure 5 c).

Pour l'étude de la relation âge/diamètre (A/D), les types de racines n'ont pas été pris en compte : nous avons utilisé quatre classes de diamètre (2, 5, 8 et 10 cm) et la distance de prélèvement par rapport au collet a été notée. Pour l'étude de la croissance (CT), les racines ont été choisies en fonction de leur type et selon leurs caractéristiques morphologiques puis débitées en 4 à 5 morceaux répartis sur toute la longueur de la racine en notant la distance entre chaque prélèvement.



Figure 2 - Système racinaire mixte de Mélèze, extrait de la digue de Castérino.

Type d'étude	A/D	CT
Site 1 - Levée la Loire	126	96
Site 2 - Digue de Castérino	64	44
Sous total	190	140
Total	330	

Figure 3 - Nombre d'échantillons prélevés et analysés par site prélevés sur les 28 arbres étudiés (20 feuillus et 8 conifères).



Figure 4 - Racine traçante longue d'Érable.



Figure 5 - Quelques types de systèmes racinaires :
a) racine traçante courte d'Érable ;
b) racines traçante longue et courte de Pin sylvestre ;
c) pivot de Pin sylvestre.

Suivant la méthodologie exposée dans Gärtner *et al.* (2001) et Bodoque *et al.* (2005), les échantillons de racines initialement prélevés (15 cm de longueur) ont séché à température ambiante pendant 1 à 2 mois, puis ont été recoupés en rondelles de 2 à 3 cm d'épaisseur. Les échantillons ont ensuite été ponçés avec des bandes abrasives aux tailles de grains décroissantes (Figure 6a). De la craie blanche a été frottée sur les rondelles ponçées afin d'augmenter les contrastes au niveau de la structure des cernes et de faciliter ainsi la lecture comme indiqué dans Krause *et al.* (1994). Le dénombrement des cernes de croissance a été effectué sous une loupe binoculaire (Figure 6b).

Les différences entre la structure du bois de la partie aérienne et celle de nos échantillons racinaires ont pu être observées à l'aide de l'atlas d'anatomie des bois de Schweingruber (1982). Les cernes de croissance sont généralement plus difficiles à identifier sur le bois racinaire.

Les âges des échantillons de racines ont été moyennés par classe de diamètre (8 échantillons par classe) pour chaque espèce. Les coefficients de détermination ont été calculés afin de vérifier la solidité de la relation âge/diamètre. Les résultats portant sur la croissance des racines n'ont été que partiellement traités.



Figure 6 - Travaux au laboratoire :
a) ponçage des échantillons ;
b) lecture de cernes sous loupe binoculaire.

II - RÉSULTATS

1 - Etude de la relation âge/diamètre

Une relation entre l'âge et le diamètre des racines a été mise en évidence (Figure 7) : elle est de type puissance [$f(x) = bx^a$] qu'il s'agisse des feuillus ou des conifères. Avec les quatre classes de diamètre (2, 5, 8 et 10cm), le coefficient de détermination, toutes espèces confondues est de 0,7 (Figure 8). Très élevé chez le chêne, le peuplier, l'érable et le mélèze (0,8 à 0,9), ce coefficient est moyen chez le robinier (0,5) et faible chez le pin sylvestre (0,2).

Chez le pin sylvestre, la faiblesse de la relation s'explique par le fait que l'âge moyen des échantillons de la classe 10 cm (51 ans) est inférieur à celui de la classe 8 cm (54 ans) et égal à celui de la classe 5 cm, et que les écarts d'âge au sein d'une même classe sont élevés (Figure 7). Cette espèce présente les racines les plus âgées pour chaque classe de diamètre.

Chez toutes les autres espèces, les âges s'accroissent avec la classe de diamètre. Chez le mélèze, les âges moyens sont respectivement 25, 35, 46 et 49 ans. Les racines de conifères dans notre échantillon présentent une croissance plus lente que celle des feuillus du fait de leurs conditions de développement moins favorables (en milieu montagnard). Elles sont donc plus âgées que celles des feuillus à diamètre égal.

Pour les feuillus, on note une vitesse de développement croissante dans l'ordre suivant : érable négundo, peuplier, robinier et chêne (Figure 7).

L'érable négundo est une essence importée d'Amérique du Nord, à croissance rapide, considérée comme

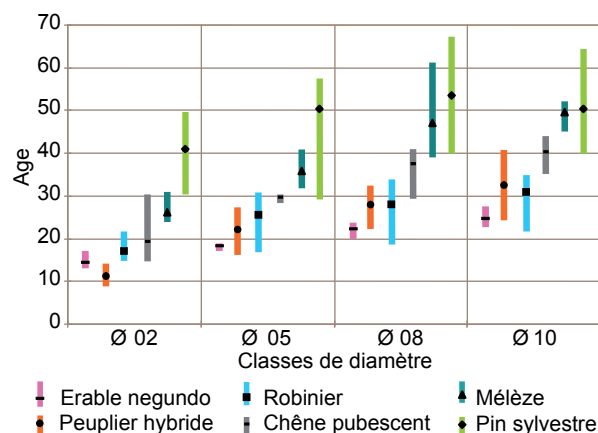


Figure 7 - Âge des racines en fonction des quatre classes de diamètre et de l'espèce végétale (moyenne $\pm$ 1 écart-type).

invasive en bordure de cours d'eau. Les âges moyens des racines sont 14, 17, 21 et 24 ans pour les classes de diamètres considérées. La croissance des racines de peuplier est initialement un peu plus rapide que celle du robinier mais moins soutenue dans le temps, ce qui aboutit à des diamètres équivalents pour les âges élevés (10, 21, 27 et 31 ans contre 16, 25, 27 et 30 ans). Ces deux espèces sont des pionnières qui colonisent rapidement les remblais.

Le chêne a la vitesse de croissance racinaire la plus faible en diamètre. Il s'agit d'une espèce de peuplement mature apparaissant plus tard dans la succession végétale et à croissance aérienne lente. Les âges moyens sont 18, 28, 36 et 39 ans.

Les différences de croissance en diamètre des racines sont liées à l'espèce végétale mais également à la position de l'arbre sur la digue (Figure 9). En effet, les conditions de développement sont différentes suivant que l'arbre se trouve en milieu sec sur le talus coté terre (CT) ou en condition plus humide coté rivière (CR) et s'il est implanté soit en pied de digue (conditions plus humides) soit en haut (conditions drainantes). Dans le cas des feuillus, les érables étudiés se situaient principalement en pied de digue, tandis que les chênes étaient généralement implantés sur

la partie supérieure de la digue. Les peupliers et les robiniers avaient une répartition homogène. Dans le cas des conifères, les pins sylvestres étaient implantés sur le talus coté terre, en conditions drainantes et les mélèzes sur le talus coté rivière ou en crête.

Espèces	Nb d'échantillons (Ø : 02 ; 05 ; 08 ; 10)	Coefficient de détermination (r^2)	Probabilité * $P < 0,05$ *** $P < 0,001$	Coefficients b et a de $f(x) = bx^a$
Chêne	32	0,93	***	$y = 4,6787x^{0,4907}$
Érable	30	0,84	***	$y = 5,8058x^{0,301}$
Peuplier	32	0,85	***	$y = 1,8101x^{0,6505}$
Robinier	32	0,51	***	$y = 8,0744x^{0,2934}$
Mélèze	32	0,85	***	$y = 4x^{0,5695}$
Pin sylvestre	32	0,17	*	$y = 23,043x^{0,1846}$
Total	190	0,69		

Figure 8 - Relation âge/diamètre chez les six espèces étudiées.

Espèces	Age le l'arbre le plus vieux	Position sur la digue	Diamètre au collet (cm)	Age de la plus vieilles racines	Diamètre de la racine (cm)	Rapport A/D arbre	Rapport A/D racine
Chêne	45	CR Haut	67	43	9	1,49	0,21
Érable	32	CR Milieu	75	27	8,3	2,34	0,31
Peuplier	42	CR Pied	77	39	8,6	1,83	0,22
Robinier	47	CR Haut	73	34	7,5	1,55	0,22
Mélèze	67	CT Haut	69	60	7,5	1,03	0,13
Pin sylvestre	71	CR Haut	59	68	7,5	0,83	0,11

Figure 9 - Caractéristiques des arbres et racines les plus âgés en fonction des espèces

Le rapport âge/diamètre pour les arbres et pour les racines des sujets les plus âgés permet de rendre compte des vitesses de croissance pour chaque espèce considérée (Figure 9). Les essences peuvent être classées en fonction de leur vitesse de croissance selon un gradient positif : pin sylvestre, mélèze, chêne, robinier, peuplier et érable. Il existe une forte corrélation des rapports A/D des parties aériennes et des plus grosses racines toutes espèces confondues ($r^2 = 0,96$). On peut en déduire, pour les arbres non recépés, la taille potentielle des plus grosses racines en connaissant les dimensions et l'âge de la partie aérienne.

2 - Étude de la croissance des racines en fonction de leur type

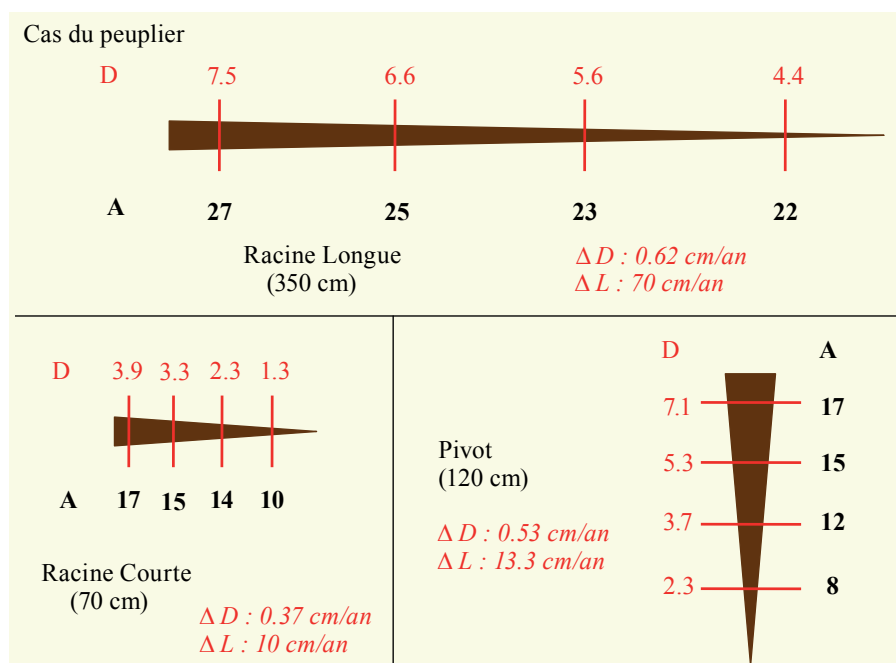
Des variations de la vitesse de croissance sont aussi observées selon le type de racines (Figure 10).

On retrouve les trois types de racines chez les six espèces étudiées, à l'exception des pivots qui sont de taille réduite voire inexistants chez les érables et les robiniers.

La Figure 10 illustre ces types de racine chez le peuplier. Ces trois exemples révèlent des différences de croissance en longueur importantes entre les racines longue, courte et pivotante.

La croissance en diamètre et la relation âge/diamètre ne sont pas très différentes chez les trois types de racines. C'est surtout l'allongement (ou croissance en longueur), qui diffère ; les Pivots et les Courtes étant relativement proches (13,3 et 10 cm/an) par rapport aux racines Longues (70 cm/an) de peuplier.

Figure 10 - Vitesse de croissance chez 3 types de racines chez le peuplier. D : Diamètre (cm) ; A : Age (année) ; ΔD : Croissance en diamètre ; ΔL : Croissance en longueur.



III - DISCUSSION ET PERSPECTIVES

La vitesse de croissance racinaire dépend de différents paramètres de contrôle (Fayle, 1968) parmi lesquels l'espèce et les conditions environnementales (substrat, variations météorologiques ou climatiques, accès à l'eau). Il apparaît dans ce travail que les dimensions des racines et la relation âge/diamètre dépendent aussi du type de racine et de la distance au collet.

L'importance des matériaux ressort clairement : dans les matériaux grossiers et pauvres (dominés en proportions variables par des graviers, galets ou blocs), les contraintes physiques empêchent le développement de nombreuses racines, les obligeant à contourner chaque obstacle ; par ailleurs, la pauvreté chimique et la faible capacité de rétention en eau de ces matériaux obligent

les arbres à prospector très loin de leur souche pour se nourrir. Ces deux contraintes donnent des systèmes racinaires contrastés avec quelques grosses et très longues racines courant souvent à faible profondeur mais pouvant aussi pénétrer et traverser le corps de digue, combinées avec un nombre réduit de racines courtes obliques généralement très tortueuses et densément ramifiées. La présence d'un pivot significatif dépend de la possibilité d'accès à l'eau en profondeur. En cas d'eau disponible, ces pivots peuvent croître rapidement, bien plus vite que les autres racines (Chandioix *et al.*, 2005 ; Doirat *et al.*, 2003) comme le confirment les mesures réalisées au cours de ce projet. Ils peuvent poser des problèmes de sécurité après pourrissement

en créant de véritables trous verticaux dans la digue, d'une profondeur dépassant deux mètres. Dans les matériaux fins et riches (limons plus ou moins sableux ou argileux), les contraintes physiques sont faibles et l'alimentation de l'arbre peut se faire à proximité de la souche. Le système racinaire est donc plus homogène, envoyant des racines dans toutes les directions, y compris dans le corps de digue ce qui pose systématiquement un problème sécuritaire. Si on observe toujours une différence significative entre racines longues et peu ramifiées et racines courtes et fortement ramifiées, la différence de croissance en diamètre et longueur est moins marquée car le rôle d'alimentation de l'arbre est plus partagé. La relation âge/diamètre n'est pas très différente entre racines courtes et racines longues pour une espèce donnée. La plus grande croissance en longueur du deuxième type fait que le diamètre est plus important à grande distance de la souche. C'est ce qui rend les racines longues dangereuses lorsqu'elles pénètrent dans les digues. Les racines courtes sont moins dangereuses individuellement, mais elles peuvent être nombreuses et créer une destructuration importante du matériau à proximité et dans le prolongement de la souche.

Tous les arbres étudiés y compris les plus jeunes (15 ans) ont des racines dans les 4 classes de diamètre considérées, donc atteignant ou dépassant 10 cm, et constituent déjà une menace potentielle pour la sécurité des ouvrages. Les arbres âgés de plus de 20 ans peuvent avoir quelques racines beaucoup plus grosses (jusqu'à 30 cm de diamètre au collet). Celles-ci n'ont pas été prises en compte dans cette étude par manque de répétabilité. Il sera nécessaire de compléter l'échantillonnage dans une prochaine étape. De même, les différences de structure en raison du type de matériau devraient contribuer à la variabilité du rapport âge/diamètre pour les plus grosses racines longues. Cette différence ne pourra être démontrée, si elle existe, que par des mesures complémentaires.

Chez le robinier, qui se reproduit régulièrement de façon asexuée par drageons, une racine peut être reliée directement à plusieurs arbres du même âge ou d'âges différents. Etant alimentée par ces multiples individus, ce type de racine a une croissance plus rapide que des racines reliées à un seul arbre. Il arrive qu'une racine drageonnante soit plus grosse localement que le plus gros des troncs qu'elle porte, et qu'elle dépasse 15 m de longueur. Sa croissance en diamètre peut avoir fortement varié dans le temps si certains arbres ont été coupés, et s'être accélérée lorsque de nouveaux individus connectés se sont développés. Par contre, ces racines spéciales sont toujours traçantes et très superficielles et ne posent donc que rarement des problèmes de sécurité.

Pour le pin sylvestre dans notre cas, la croissance ralentit fortement avec l'âge, notamment à cause de la faible fertilité du substrat et de la rudesse du climat. Les variations temporelles sont inférieures à la marge

d'incertitude du modèle âge/diamètre. Un échantillon plus grand et plus diversifié est nécessaire.

La vitesse de croissance en diamètre des racines augmente avec la proximité du collet. Ceci pourrait s'expliquer par la diminution du nombre de ramifications alimentant la racine avec l'éloignement de la souche.

D'autres paramètres peuvent expliquer la variabilité entre racines de la relation âge/diamètre. Les racines trouvent individuellement des conditions différentes (accès à l'eau, types de matériaux, richesse nutritive), entre le haut, milieu et bas de digue suivant la direction où elles poussent. Donc des racines qui ont la même vitesse au départ quand elles sont jeunes peuvent diverger ensuite parce que l'une ira vers un milieu plus sec, l'autre vers une zone humide, l'une dans un matériau riche, l'autre dans des graviers stériles... D'autre part, chaque racine peut être plus ou moins radialement connectée à une partie du houppier de l'arbre et celui-ci avec le temps peut être déséquilibré par la concurrence avec d'autres arbres, ou par des accidents (casse de branches par vent ou neige...). Lorsque les arbres sont recépés, le système racinaire qui n'est plus que faiblement alimenté pendant plusieurs années (5-10 ans ou plus suivant les conditions et la vigueur des rejets) ralentit sa croissance. Pour les feuillus qui sont recoupés régulièrement sur les digues, ces inflexions peuvent être visibles sur les données brutes de largeurs de cernes. Elles conditionnent évidemment la relation âge/diamètre. Mais le recépage ne doit en aucun cas faire oublier que le système racinaire reste en place et continue sa croissance.

Enfin, certaines racines d'un arbre peuvent être localement fortement concurrencées par celles d'un autre arbre, ou par d'autres espèces (notamment herbacées pour les racines traçantes), alors que d'autres se développent plus librement sans concurrence. De ce fait, le développement individuel des racines peut être très variable et différent de la moyenne du tronc. D'ailleurs, il serait intéressant d'observer si les variations interannuelles de croissance peuvent être interdatées sur des racines appartenant à différents arbres, et si les racines enregistrent les signaux climatiques de la même façon que la partie aérienne et notamment le tronc (Heuzé *et al.*, 2009 ; Krause *et al.*, 1994).

L'âge de l'arbre évalué à la tarière de Pressler ou après abattage permet, dans le cas des résineux et des feuillus de franc-pied, d'appréhender l'âge des plus vieilles racines que le système racinaire puisse porter et donc le diamètre potentiel de celles-ci. Dans le cas des feuillus qui ont été recépés une ou plusieurs fois, il est nécessaire de prendre en compte l'âge de la souche parfois beaucoup plus élevé que ne le laisse supposer le ou les rejets. En l'absence de documents de gestion ou de recours à une interdatation dendrochronologique avec des arbres vivants voisins, cette estimation de l'âge de la souche est difficile ou impossible visuellement. C'est alors l'âge d'une des plus

grosses racines qui peut donner le renseignement, bien que celles-ci soient souvent creuses ou pourries dans le cas de vieilles souches. Comme globalement une relation âge/diamètre des racines semble exister pour une espèce donnée, la partie manquante pourrait être datée à l'aide de cette relation. L'imprécision relative n'est pas ici un handicap pour la gestion car le danger apparaît pour des racines d'assez faibles dimensions, donc beaucoup plus jeunes que celles qui peuvent poser problème sur les vieilles souches. Ces dernières sont toujours dangereuses, et ont parfois des racines bien plus grosses que les troncs qu'elles portent.

Ce travail constituait une étude préliminaire sur un échantillon réduit. Il montre qu'il existe une relation âge/diamètre des racines et qu'elle peut être évaluée sommairement à partir du rapport âge/diamètre du tronc. Mais elle doit tenir compte de très nombreux paramètres de l'environnement et ne peut en aucun cas être généralisée. A ce stade, aucun modèle unique, même par espèce, n'est envisageable. Par contre, un

échantillon de taille suffisante, représentatif de nombreuses combinaisons des contraintes d'environnement, permettrait de dégager l'influence de ces divers paramètres et leurs interactions. Les seuils critiques pour la gestion devront, de plus, pendre en compte la dimension de l'ouvrage qui influence le niveau de risque pour un système racinaire donné. En effet une racine de gros diamètre est plus dangereuse dans des matériaux cohésifs ou sur une digue étroite que dans des matériaux graveleux ou sur une digue large.

Cet outil mérite donc d'être développé en intégrant les paramètres précédemment énoncés afin d'aider les gestionnaires à la prise de décision. Il s'agirait d'un système expert plus que d'un modèle à proprement parler, et qui nécessiterait une bonne connaissance du sujet par les utilisateurs. Même si l'intervalle de confiance du ratio âge/diamètre est assez large, cette relation mise dans son contexte pourrait être suffisante pour un usage opérationnel, où les limites critiques sont ajustées avec un fort coefficient de sécurité.

BIBLIOGRAPHIE

- CHANDIOUX O., VENNETIER M., ESTEVE R., RIPERT C., 2005. Étude de la végétation des digues du Rhône : Étude des systèmes racinaires. Cemagref, Aix en Provence, 9 p.
- DOIRAT G., RIPERT C., 2003. Étude du plan de gestion de la végétation arborée des digues de l'Isère. Cemagref, Aix en Provence, 76 p.
- FAYLE D.C.F., 1968. Radial Growth in Tree Roots - Distribution, Timing, Anatomy. Faculty of Forestry, Toronto, 184 p.
- GÄRTNER H., SCHWEINGRUBER F.H., DIKAU R., 2001). Determination of erosion rates by analyzing structural changes in the growth pattern of exposed roots. *Dendrochronologia*, 19, 1, 81-91.
- HEUZÉ P., DUPOUEY J.-L., SCHNITZLER A., 2009. Radial growth response of *Hedera Helix* to hydrological changes and climatic variability in the Rhine floodplain. *River Research and Applications*, 25, 393-404.
- KRAUSE C., ECKSTEIN D., 1994. Dendrochronology of roots. *Dendrochronologia*, 11, 9-23.
- MÉRIAUX P., ROYET P., 2007. Surveillance, maintenance and diagnosis of flood protection dikes - A practical handbook for owners and operators. 162 p.
- MÉRIAUX P., VENNETIER M., AIGOUY S., HOONAKKER M., ZYLBERBLAT M., 2006. Diagnostic et gestion de la végétation sur les digues et barrages en remblai. Commission Internationale des Grands Barrages, Comptes rendus du 22^e congrès, Barcelone, 1-19.
- SCHWEINGRUBER F.H., 1982. Anatomie microscopique du bois. Institut Fédéral de Recherche Forestière, Zurich, 220 p.
- VENNETIER M., RIPERT C., CHANDIOUX O., MÉRIAUX P., DOIRAT G., 2005. Gestion de la végétation des digues et berges sous contrainte de sécurité. *Ingénieries EAT*, n° spécial, 3-14.
- ZANETTI C., 2007. L'enracinement des arbres dans les digues : Morphologie des systèmes racinaires - relation avec l'érosion. Cemagref - Université de Provence, 1, 68.
- ZANETTI C., VENNETIER M., MÉRIAUX P., ROYET P., DUFOUR S., PROVANSAL M., 2008. L'enracinement des arbres dans les digues en remblai : étude des systèmes racinaires et impacts sur la sécurité des ouvrages. *Ingénieries EAT*, 53, 49-67.

3.4. Conclusions de l'article

Des échantillons de racines ont été prélevés sur des souches de feuillus extraites des levées de la Loire ainsi que sur des souches de résineux implantées sur une digue de fermeture de barrage dans les Alpes Maritimes (Castérino). Six espèces végétales ont été étudiées au total. La vitesse de croissance des racines dépend de l'espèce mais également de la position de l'arbre sur la digue. Une relation entre l'âge et le diamètre des racines a été mise en évidence et présente un bon coefficient de détermination, toutes espèces confondues. Chez toutes les espèces, les âges s'accroissent avec la classe de diamètre.

Des variations de la vitesse de croissance sont aussi observées selon le type de racines (Longue, Courte et Pivot). C'est surtout l'allongement ou la croissance en longueur des racines qui diffère : les Pivots et les Courtes étant relativement proches l'une de l'autre, et différentes des racines Longues.

Le rapport âge /diamètre (A/D) pour les arbres et pour les racines des sujets les plus âgés permet de rendre compte des vitesses de croissance pour chaque espèce considérée. Les essences peuvent être classées en fonction de leur vitesse de croissance selon un gradient positif : pin sylvestre, mélèze, chêne, robinier, peuplier et érable. Il existe une forte corrélation entre les rapports A/D des parties aériennes et des plus grosses racines toutes espèces confondues ($r^2 = 0,96$). On peut en déduire, pour les arbres non recépés, la taille potentielle des plus grosses racines en connaissant les dimensions et l'âge de la partie aérienne.

Le ratio âge/diamètre des grosses racines d'un arbre semble proportionnel au ratio âge/diamètre du tronc. La définition de seuils en termes de dimension des racines doit également prendre en compte le type de matériaux constitutifs des ouvrages, dont dépend le niveau de risque. Dans le cas des arbres de franc-pied, ces travaux permettraient aboutir à un système opérationnel fiable d'aide à la décision concernant la gestion de la végétation arborescente implantée sur les digues. Cependant, dans le cas des rejets, nombreux sur les digues, il est plus difficile d'appréhender la dimension des racines à partir de la taille de l'arbre ; la souche étant généralement bien plus volumineuse que ce que le laisse supposer la partie aérienne du rejet.

3.5. Comparaison anatomique du bois de racines sur digues et sur sols de montagne

Toutes les racines que nous avons analysées (bois de feuillus et conifères confondus) présentait des cernes de croissance avec alternance de bois initial et final.

Les propriétés des cernes de croissance de nos racines extraites de la digue de Castérino ont été comparées à celles implantées dans des sols naturels en montagne. Jérôme Lopez Saez (Cemagref Grenoble) et Christophe Corona (IMEP Aix-en-Provence) utilisent les racines de conifères comme marqueurs de l'érosion sur les terrains marneux du massif alpin. Ils mettent clairement en évidence que lors du déchaussement de la racine (lorsqu'il ne reste plus que quelques millimètres de sol au dessus de l'écorce) une modification anatomique du bois s'opère. Sur les racines enterrées, on ne distingue pas de bois initial et final, tandis qu'à partir de la mise à l'air de la racine on observe cette différenciation. En examinant nos échantillons, nous avons noté que les racines extraites de la digue présentent clairement et dès leur plus jeune âge une structure distincte au sein d'un cerne avec alternance de bois initial et final. Ces échantillons de racines de conifères (pin sylvestre et mélèze) ont été prélevés dans un remblai de digue, constitués de blocs et de graviers au sein d'une matrice limoneuse, entre 20 cm et 1,50 m de profondeur.

Nous nous sommes alors interrogés sur les modalités de formation du bois de racines présentant une structure anatomique proche de celle du bois de la partie aérienne des arbres. Les facteurs pouvant expliquer la formation de bois initial et final pourraient être le taux d'oxygénation (assez faible dans les marnes, plus élevé dans les remblais des digues ?) ou les variations saisonnières de température (plus réduites dans les sols naturels que dans les digues ?).

Nous avons donc décidé de comparer les différences de température entre sol naturel et digue sur un même site. Les variations thermiques sont supposées être plus importantes au sein d'un remblai exhaussé par rapport au terrain naturel, dont les talus sont en contact avec l'air ambiant, que dans un sol naturel.

Une expérimentation a été mise en place à partir du 15 avril 2010 sur le site du Cemagref d'Aix-en-Provence. Nous avons utilisé le bassin expérimental PEERINE (modèle à échelle réduite d'un ouvrage hydraulique en argile, dédié à l'étude de systèmes de détection de fuites par fibre optique).

Huit sondes thermiques (3 PT 100 et 5 Thermistances) ont été enterrées entre -10 et -100 cm de profondeur, dans la digue et dans le sol en pied de digue (Figure III.Ch3.1). Les forages ont été réalisés perpendiculairement à la surface du talus et du sol. Les matériaux extraits ont été replacés au dessus de chaque sonde mais n'ont pas pu être recompactés.

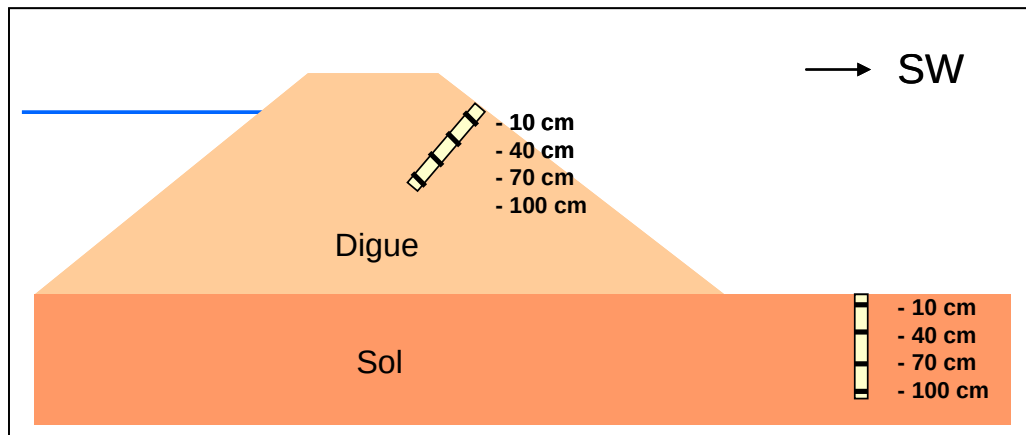


Figure III.Ch3.1 : Position des 8 sondes thermiques enterrées dans la digue et dans le sol.

Les mesures présentées ici ont été acquises entre mi-juin et mi-août 2010 (Figure III.Ch3.2).

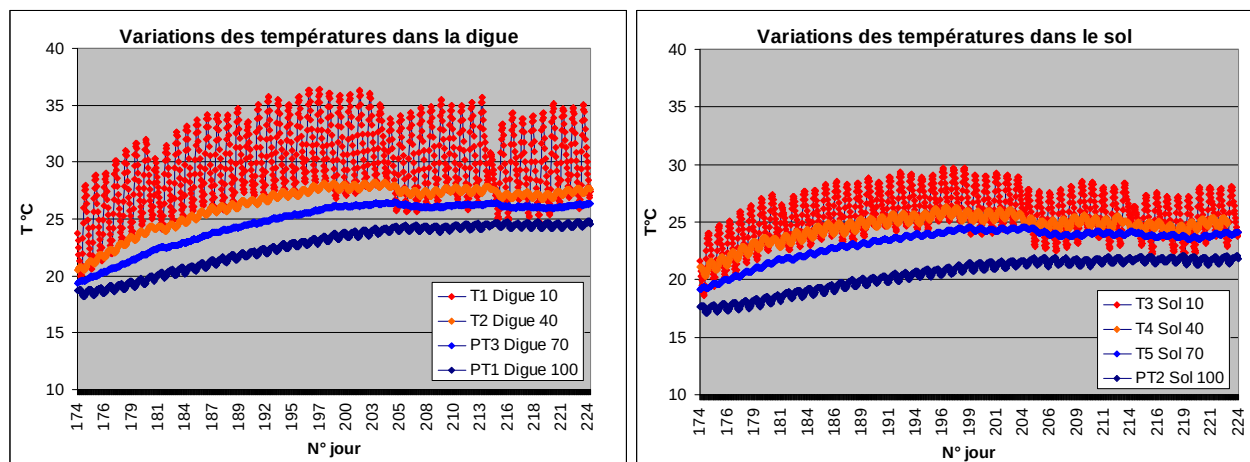


Figure III.Ch3.2 : Variations des températures dans la digue et dans le sol entre le 23 juin 2010 (jour 174) et le 12 août 2010 (jour 224)

L'amplitude thermique journalière maximale sur la période de juin à août 2010 est de 9°C dans la digue et de 5,5°C dans le sol du terrain naturel. Les températures moyennes sont, respectivement à -10, -40, -70 et -100 cm de profondeur, de 29,7°, 26,3°, 24,7° et 22,6°C dans la digue et de 25,5°, 24,4°, 23,2° et 20,4°C. La différence de température moyenne entre la digue et le sol est de plus de 4°C en surface et de 1.5 à 2°C en profondeur.

Globalement la température est plus élevée dans la digue que dans le sol, de même que l'amplitude thermique. Ceci s'explique certainement par le fait que la digue est en surélévation par rapport au niveau du terrain naturel (permettant une exposition de la crête de l'ouvrage mais aussi du talus orienté SW) et que les rayons du soleil, à cette époque de l'année, sont perpendiculaires aux pentes exposées au sud, aux heures les plus chaudes de la journée.

Cette expérience nous permet de conclure que, dans les matériaux argileux, la température moyenne et l'amplitude thermique sont plus élevées dans la digue que dans le sol naturel. Ceci dépendra cependant beaucoup de la saison (incidence des rayons solaires selon l'orientation).

Les données scientifiques ont montré qu'à teneur en eau et densité égales, les matériaux argileux ont une plus faible conductivité thermique que les matériaux sableux et graveleux (Abu-Hamdeh 2001; Kersten 1952). Ceci signifierait que dans les digues en remblai grossier (sablo-graveleux) les variations thermiques pourraient être beaucoup plus importantes que ce que nous avons pu observer dans les argiles.

A ce stade, nous ne pouvons cependant pas conclure que les différences d'amplitude thermiques sont à l'origine de la différenciation anatomique du bois de racines implantées dans les digues et dans les sols marneux du massif alpin. Des expérimentations plus poussées sont nécessaires pour tenter d'identifier les paramètres influençant la formation de cernes initial et final dans le bois racinaire, en prélevant d'autres échantillons de racines sur des digues constituées de différents types de matériaux et en suivant l'évolution des températures sur des digues et sols à texture grossière.

3.6. Perspectives

Les échantillons de racines ont été analysés dans un laps de temps restreint. Toutes les données acquises sur l'âge des racines en fonction de leur diamètre, de la distance à la souche et des différents types de racines n'ont pas été exploitées. Les résultats énoncés dans l'article III concernant les vitesses d'accroissement en longueur des racines doivent être vérifiés par des analyses complémentaires, de même que la relation âge /diamètre qui doit être confortée par de nouveaux prélèvements.

D'autres études pourraient être effectuées afin de vérifier certaines hypothèses telles que l'existence d'un bois de cœur au sein des racines de structure par identification du processus de duraminisation*, ou le rôle de la température dans le développement de bois de printemps et d'été dans les cernes de croissance de racines implantées sur des digues.

Il serait intéressant de profiter de ces travaux pour comparer les variations relatives interannuelles de largeurs de cernes entre les racines globalement et le tronc au sein d'un même arbre, ainsi que ces différences entre les principales racines d'un arbre. En raison de leur rôle fonctionnel en partie différent, de leur accès à des ressources variables (nappe permanente ou non, surface ou profondeur, crête ou pied de digue, il est probable que chaque racine montre un comportement différent suivant les stress subis par l'environnement global

de l'arbre, et que ces variations expliquent en partie pourquoi la croissance en diamètre du tronc et ses variations annuelles ne sont pas homogènes sur l'ensemble de son périmètre.

Si la croissance des racines est néfaste pour la sécurité des ouvrages hydrauliques en remblai, l'abattage des arbres et la mort des souches génèrent des risques encore plus importants : en effet, la décomposition des racines et des souches crée, au bout d'un laps de temps qu'il est important de connaître, des zones de faible densité, voire des vides, dans le corps de digue. Ce point est traité dans le prochain chapitre.

Chapitre 4

Décomposition racinaire

SOMMAIRE

Préambule.....	124
4.1. Présentation du projet d'article IV.....	124
4.2. Projet d'article IV : Tree roots decay in earth dikes	124
4.3. Conclusions du projet d'article et perspectives	136

Statut de l'article IV

Projet - à compléter et à soumettre en 2011 pour publication éventuelle dans une revue à définir (*Canadian Journal of Forest Research* ou *Journal of Experimental Botany*).

PREAMBULE

Le phénomène de décomposition des racines a été observé sur des souches mortes lors des chantiers d'extraction des systèmes racinaires. Des éléments importants ont pu être identifiés, tels que la formation de galeries par les racines pourries ou l'apparition d'effondrements suite à la décomposition totale des souches.

Les informations permettant d'estimer les vitesses de décomposition des racines dans les digues sont difficiles à obtenir, alors qu'on trouve dans l'histoire des barrages des cas de graves incidents s'étant manifestés plusieurs années après le déboisement d'un parement (ex : barrage de Saint-Ferréol - Mériaux et al., 2006 et barrage de Torcy-Vieux - Testemale et al., 1999). En effet, les gestionnaires peuvent rarement fournir les dates exactes d'abattage des arbres permettant de calculer les vitesses de décomposition des racines.

Or, ces éléments doivent être évalués afin d'ajuster les consignes de gestion de la végétation arborée implantée sur les ouvrages hydrauliques.

Un dispositif expérimental a donc été conçu et mis en place au début de la thèse afin de suivre le phénomène de décomposition des racines dans le temps (cf. Deuxième Partie : Matériel et Méthodes 5.1.).

Ce chapitre présente les résultats obtenus au cours des derniers mois de la thèse, dans le cadre du stage de Master de Sophie Ferrat (Master bio-ressources, ingénierie biologique de l'environnement, Université Paris XII – Mars/Septembre 2010).

Ce travail a été effectué en collaboration avec le Laboratoire d'Etudes des Ressources Forêt - Bois de l'INRA de Nancy (Dr Fleur Longuetaud et Charline Freyburger) et le Laboratoire des Systèmes Chimiques Complexes de l'Université de St-Jérôme (Dr Pierre Vanloot).

4.1. Présentation du projet d'article IV

Des échantillons de racines de 20 cm de longueur et de différentes classes de diamètre (02, 03, 05, 08 et 10 cm) ont été enterrés à 50 cm de profondeur sur des digues à charge hydraulique temporaire à Grenoble et à Castérino. Ceux implantés sur le site de Grenoble, en Isère, ont été déterrés au printemps 2010, après deux années de décomposition. Les espèces étudiées sont le chêne, le frêne, le robinier et le peuplier.

Le protocole d'analyses des échantillons de racines a été mis au point au cours du stage de Sophie Ferrat. Il s'agissait de caractériser les propriétés du bois sain (T0) et du bois décomposé après 2 années (T1) par comparaison qualitative (état de dégradation) et quantitative (densité et propriétés chimiques) des échantillons de racines (cf. Deuxième Partie : Matériel et Méthodes 5.2.).

Des échantillons de racines prélevés sur des souches abattues en 2005 ont été extraits in situ sur le même site de Grenoble au printemps 2010 afin de comparer les vitesses de décomposition en conditions expérimentales et réelles.

4.2. Projet d'article IV : Tree roots decay in earth dikes

Note : toutes les données acquises sur la décomposition des racines n'ont pas été exploitées. D'autres analyses spectroscopiques seront réalisées sur de nouveaux échantillons en 2011, en collaboration avec le laboratoire des Systèmes Chimiques Complexes de l'Université de St Jérôme à Marseille.

Introduction provisoire

La décomposition des souches et des racines présentes dans les digues et barrages en terre est néfaste vis à vis de la sécurité des ouvrages. Le risque d'érosion interne est considérablement augmenté suite à la dégradation du bois, qui laisse des zones d'hétérogénéités importantes dans les remblais. En effet, la formation de galeries, soit à l'intérieur des racines par conservation de l'écorce, soit au sein des matériaux cohésifs par conservation de l'empreinte de la structure de la racine après décomposition du bois, est susceptible d'entraîner l'apparition d'un renard hydraulique, pouvant rapidement conduire à la formation d'une brèche. D'autre part, la décomposition de la totalité de grosses souches induit l'apparition d'effondrements localisés. Ces zones de vides sont dangereuses du point de vue de la stabilité et de l'intégrité des ouvrages.

De telles observations ont été effectuées sur le terrain, au cours des excavations de systèmes racinaires, mais jamais de façon précise du fait du manque d'informations sur les dates d'abattage des arbres et la durée du processus de dégradation des souches.

Afin de caractériser le phénomène de décomposition, d'évaluer les vitesses de dégradation du bois racinaire, un dispositif expérimental a été mis en place pour suivre l'évolution du pourrissement en conditions contrôlées. Un protocole précis incluant l'étude des densités par tomographie RX et l'analyse des propriétés chimiques par spectroscopie PIR a été mis en œuvre.

Matériels et méthodes

Afin d'éviter les redondances, la partie «Matériels et Méthodes» n'est pas réexposée ici (cf. Deuxième Partie : Matériel et Méthodes 5.2).

Premiers Résultats

1. Caractérisation qualitative et quantitative des racines

1.1 Classes de dégradation

Six classes de dégradation ont été définies, la classe une étant la moins décomposée (cf. Deuxième Partie : Matériel et Méthodes 5.2.1, p.60)

Les échantillons T1 de robinier et de peuplier atteignent des indices de décomposition de 4/6, c'est-à-dire, qu'ils présentent un état de dégradation avancé avec pertes de gros fragments de bois. Les classes de décomposition s'étendent de : 1 à 3 pour le peuplier, 2 à 5 pour le robinier, 1 à 2 pour le frêne et le chêne.

En somme, lorsqu'on évalue la décomposition des racines par classe de dégradation, l'espèce la plus dégradée est le robinier qui n'a quasiment plus d'écorce et qui a perdu de gros fragments notamment pour les diamètres les plus importants (8 et 10 cm). Ensuite, vient le peuplier qui présente également un état de dégradation avancé, surtout le plus gros diamètre (10 cm). Les échantillons arrivent malgré tout à garder leur cohérence mais présentent des surfaces étendues de gros fragments manquants et une écorce quasi disparue. Ensuite, vient le frêne qui présente des échantillons dans un état de dégradation intermédiaire avec seulement quelques petites surfaces dégradées (1 cm²) et une écorce présente en quasi-totalité. Les plus gros échantillons, sont là encore, plus touchés par la dégradation que les petits. Enfin, le chêne est dans un état de dégradation très peu avancé, seuls quelques fragments d'écorce sont manquants.

1.2 Test de pénétrométrie au couteau

Le test de pénétrométrie réalisé sur les échantillons T1 a permis de classer les espèces en 2 groupes : le bois de peuplier et de robinier est dur (niveau 2/4), alors que celui de frêne et de chêne est très dur (niveau 1/4).

2. Détermination de la masse volumique et visualisation de la structure interne des racines

Les méthodes de mesure tomographique et par déplacement d'eau ont été employées.

2.1 Tomographie rayons X

Sur les images tomographiques, les zones de faible densité apparaissent en noir tandis que les zones de fortes densités apparaissent en blanc. Sur les images tomographiques d'échantillons sains, les cernes ainsi que les verticilles sont visibles (Figure III.Ch4.1). Sur les images tomographiques de bois décomposé (Figure III.Ch4.2), les zones de pourriture se caractérisent par une faible densité. Dans les deux cas, l'écorce, sur laquelle des traces de matériaux limoneux subsistent, apparaît très blanche.

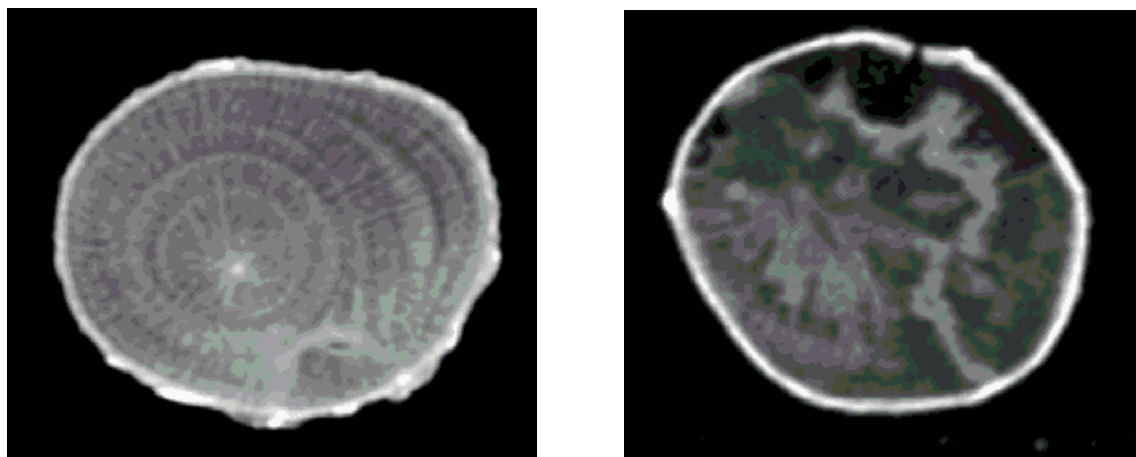


Figure III.Ch4.1 : Image tomographique d'une racine de chêne T0 en section transversale, diamètre 5 cm obtenue par IMAGE J.

Figure III.Ch4.2 : Image tomographique d'une racine de chêne T1 en section transversale, diamètre 5 cm obtenue par IMAGE J.

Les densités obtenues par tomographie RX pour les échantillons de bois sain (T0), de bois décomposé (T1), ainsi que des échantillons de souches abattues en 2005 (en décomposition depuis 5 ans) sont présentés dans la Figure III.Ch4.3.

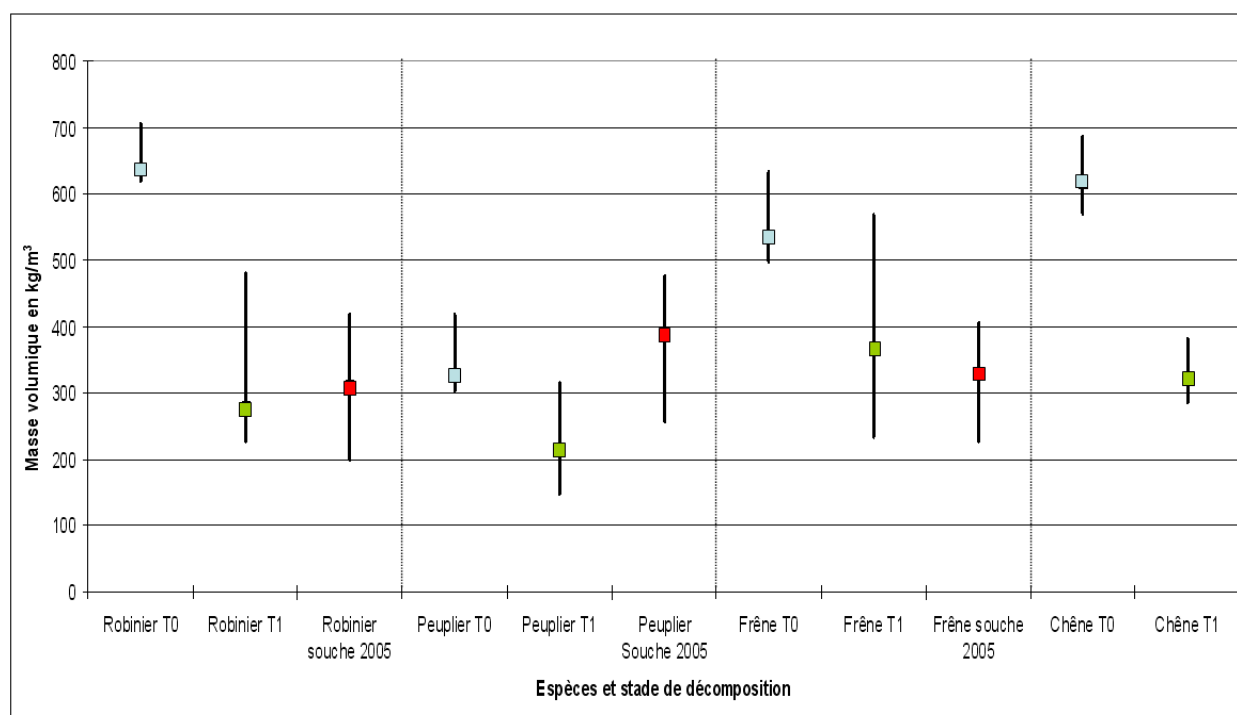


Figure III.Ch4.3 : Comparaison des masses volumiques (médianes, max, min) entre les échantillons de bois sain (T0), de bois décomposé (T1) et de souches abattues en 2005 selon les espèces végétales.

D'après ce graphique, on observe que le robinier est l'espèce qui est la plus dense à l'état T0, suivi du chêne, du frêne et du peuplier. A l'état T1, cet ordre change, on observe cette fois que le bois le plus dense est le frêne suivi du chêne, puis du robinier et du peuplier. Quant aux souches déterrées en 2005, les échantillons de peuplier semblent les plus denses, suivi du frêne et du robinier moins denses.

2.2 Déplacement d'eau

La détermination de la masse volumique par déplacement d'eau a été employée afin de valider les résultats obtenus en tomographie rayons X. Il s'avère que la tomographie donne des résultats de

densités très proches des résultats obtenus par déplacement d'eau ($R^2 = 0,991$) avec, la plus part du temps, une légère surestimation (6% en moyenne) de la masse volumique mesurée par déplacement d'eau (Tableau III.Ch4.1).

Echantillon	Masse volumique obtenue par déplacement d'eau (kg/m ³)	Masse volumique obtenue par tomographie RX (kg/m ³)	Différence de masse volumique entre les 2 méthodes (%)	Moyenne
Peuplier T0	320	315	1,6	6,1
Robinier T0	724	693	4,2	
Chêne T0	762	686	10,0	
Frêne T0	587	536	8,6	
Peuplier T1	253	189	25,2	6,7
Robinier T1	219	228	-3,8	
Chêne T1	329	322	2,1	
Frêne T1	380	367	3,3	

Tableau III.Ch4.1 : Comparaison des masses volumiques obtenues par déplacement d'eau et par tomographie rayons X sur les échantillons de racine de diamètre 2 cm.

2.3 Les facteurs influents

Des différences statistiquement significatives ont été observées entre les stades de décomposition et les espèces au niveau des densités et pertes en eau (Tableau III.Ch4.2). Il n'existe pas de différence significative entre les classes de diamètres pour les densités et les pertes en eau au stade T0, ni au stade T1.

	Masse Vol.		Perte en eau	
	T0	T1	T0	T1
Peuplier	315 (a)	189 (a)	69 (b)	53 (a)
Frêne	536 (b)	367 (b)	54 (a)	55 (ab)
Chêne	686 (bc)	322 (ab)	52 (a)	58 (ab)
Robinier	693 (c)	228 (ab)	52 (a)	62 (b)

Tableau III.Ch4.2 : Différences statistiquement significatives entre les espèces pour la masse volumique et la perte en eau au stade T0 et T1 [ex : le groupe (ab) n'est pas statistiquement différent du groupe (a) ni du (b)].

Au stade T0 (bois sain), le peuplier présente la densité la plus faible et la perte en eau la plus élevée. Il est statistiquement différent des trois autres espèces. Le frêne et le chêne sont statistiquement plus denses que le peuplier et non différents entre eux. Le robinier, qui est le plus dense, est statistiquement différent du peuplier et du frêne mais pas du chêne. Le chêne, le robinier et le frêne ne sont pas statistiquement différents entre eux et ont la plus faible perte en eau.

Au stade T1 (bois en décomposition), le bois racinaire le moins dense est celui du peuplier suivi du robinier puis du chêne et enfin du frêne qui présente la plus grande densité. Mais il n'existe une différence significative qu'entre les densités des racines de peuplier et celles de frêne aux deux extrêmes. Le robinier est l'essence qui perd le plus d'eau, tandis que le peuplier (inversement au stade T0) est l'espèce qui en perd le moins. Il n'existe une différence significative qu'entre le peuplier et robinier. Le frêne et le chêne sont intermédiaires et ne se différencient pas de chacune des deux espèces précédentes.

Quelle que soit l'espèce considérée, il y a toujours une différence significative entre les états T0 et T1 du point de vue des densités (Tableau III.Ch4.2).

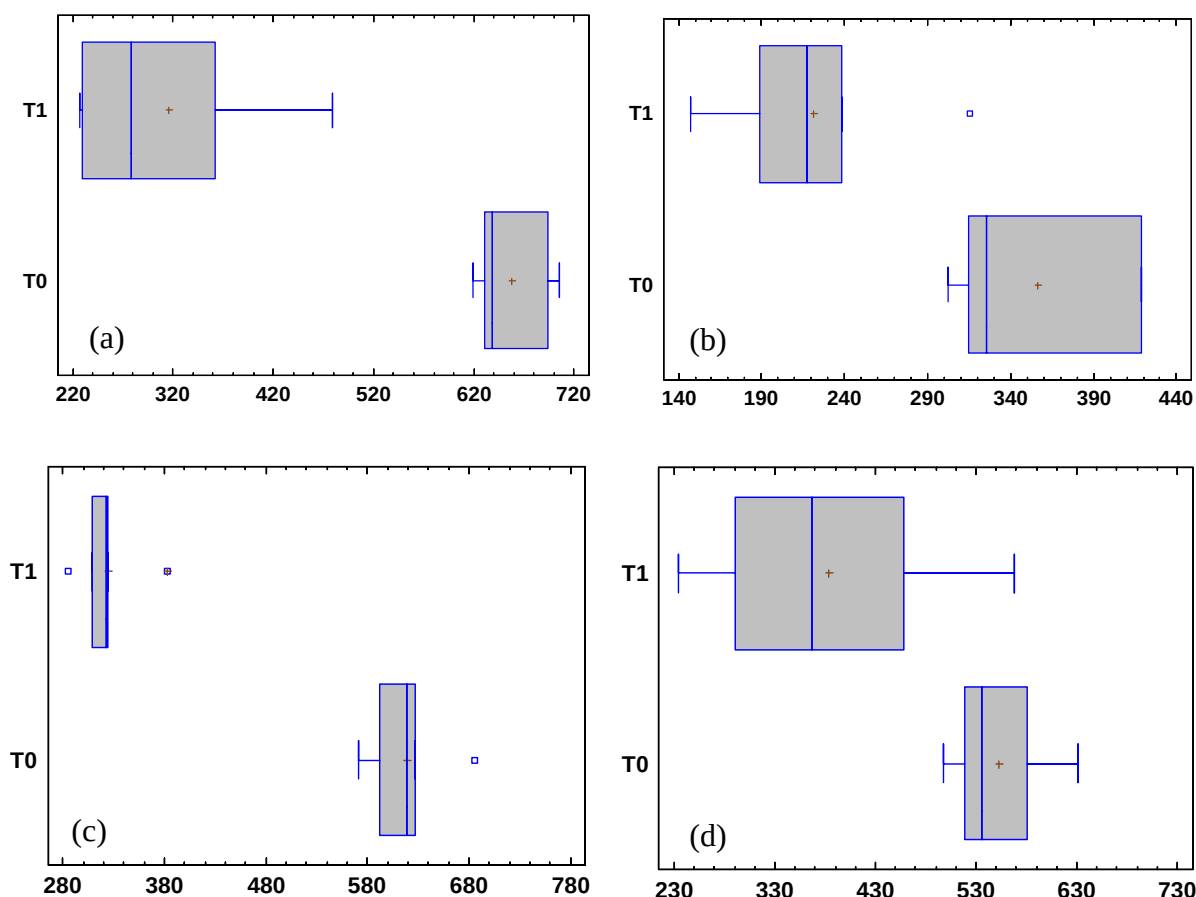


Figure III.Ch4.4 : Masses volumiques au stade T0 et T1 chez (a) le robinier, (b) le peuplier, (c) le chêne et (d) le frêne (en kg/m³). Les points représentent les valeurs extrêmes, les tirets matérialisent le premier et le neuvième décile, les limites de la boîte sont le premier et troisième quartile, la barre centrale est la médiane, tandis que le point rouge est la moyenne.

Le robinier est l'espèce qui présente la plus grande perte de densité entre T0 et T1. Ceci vient conforter nos observations de terrain où le robinier avait été identifié comme étant l'espèce la plus décomposée. Le frêne est l'espèce qui perd le moins en densité et a la densité la plus élevée au stade T1. Toutes les espèces présentent une différence significative pour la perte en eau entre T1 et T0 sauf le frêne.

L'espèce la plus sensible à la décomposition semble donc être le robinier, suivi du peuplier, du chêne puis du frêne.

3. Différenciation chimique du bois de racines par SPIR

Pour le moment, seuls les spectres de la sciure ont été traités (Figure III.Ch4.5), ceux obtenus à partir des rondelles étant moins homogènes. L'analyse des spectres en composantes principales (ACP) nous a permis de clairement distinguer les deux stades T0 et T1, les 4 espèces végétales (peuplier, robinier, chêne, frêne), ainsi que les classes de diamètre (03, 05, 08 et 10 cm).

Au stade T0, les résultats mettent en évidence une différenciation variétale avec rapprochement du peuplier et du frêne (Figure III.Ch4.6). Au stade T1, on observe également une différenciation variétale mais moins nette avec rapprochement cette fois du frêne et du chêne, le peuplier et le robinier étant plus excentrés (Figure III.Ch4.7).

Au sein d'une même espèce, la différenciation entre les stades T1 et T0 est très nette. Elle est bien marquée pour le chêne, le peuplier et le robinier (Figure III.Ch4.8). En revanche, pour le frêne, la différenciation est bien moins marquée (Figure III.Ch4.9).

Ceci conforte les résultats obtenus par mesure tomographique des densités, le robinier présente un important changement de propriétés entre les stades T0 et T1, contrairement au frêne pour lequel les modifications de densité et chimiques sont beaucoup moins marquées.

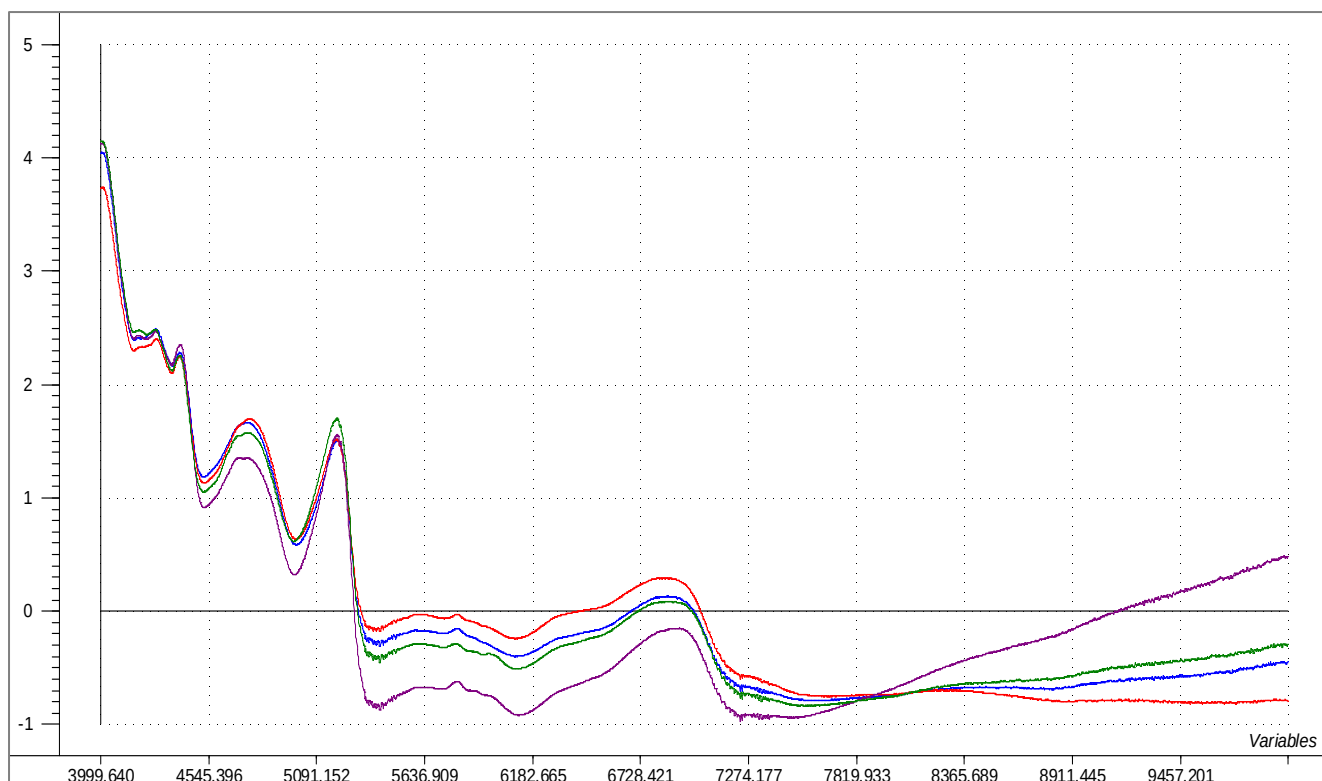


Figure III.Ch4.5 : Spectres de la sciure de bois des 4 origines variétales au stade T1 (chêne en violet, frêne en rouge, peuplier en vert et robinier en bleu). Les pics correspondent à des éléments chimiques non définis (Absorbance en ordonnée et nombre d'onde en abscisse).

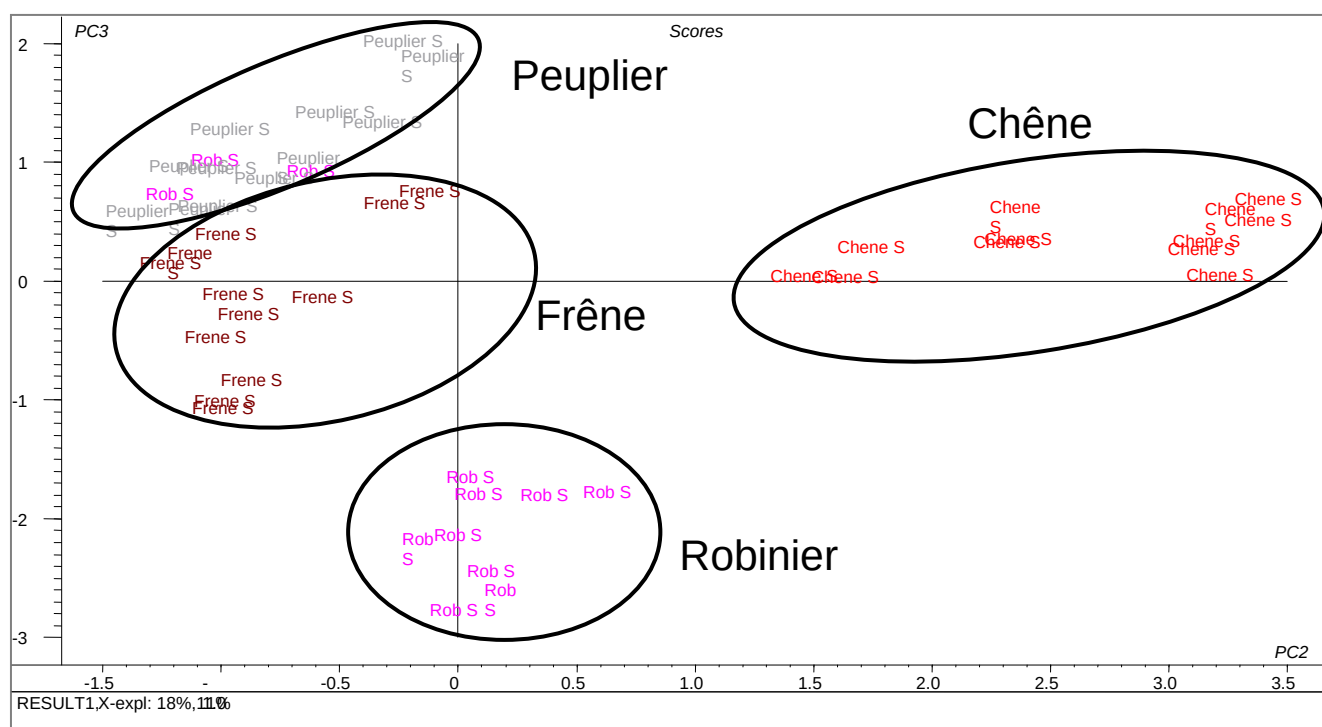


Figure III.Ch.4.6 : Différenciation variétale au stade T0 (ACP obtenue à partir des sciures).

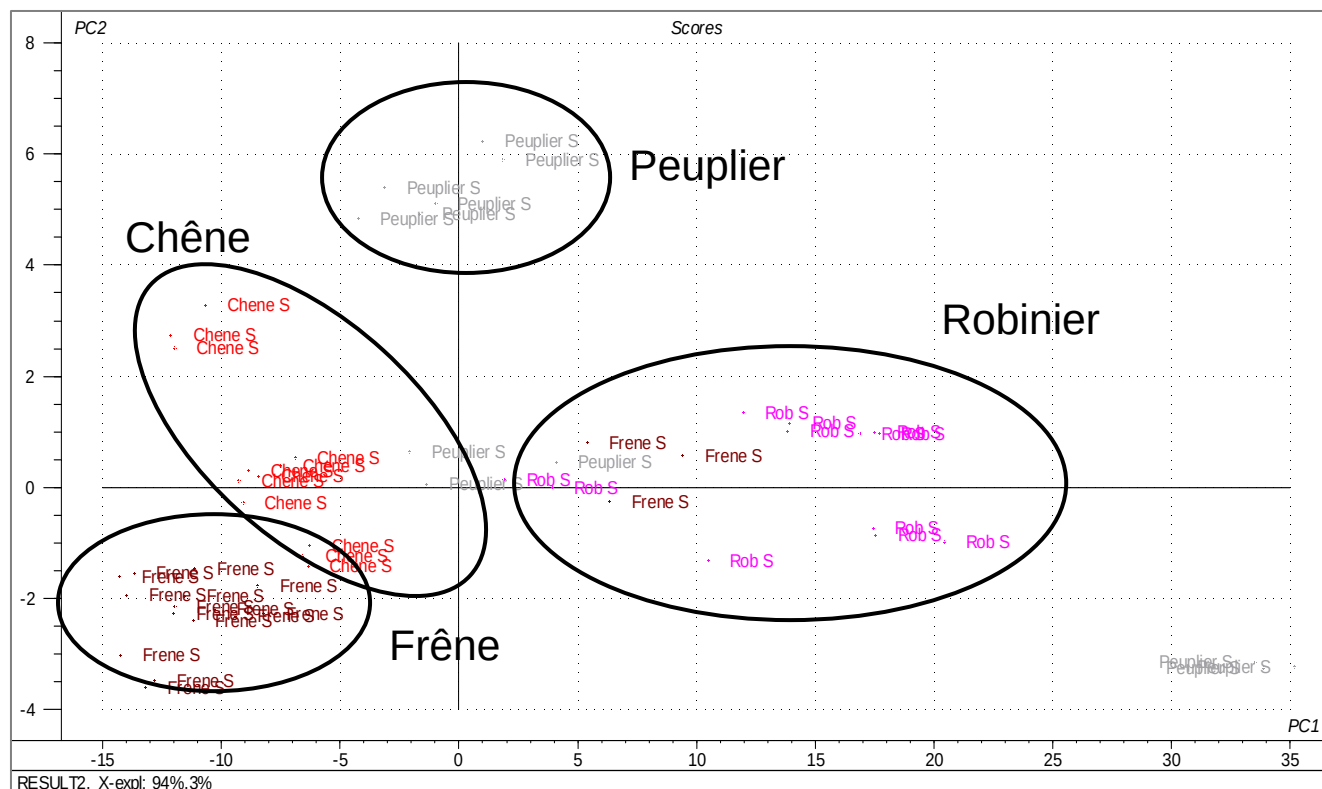


Figure III.Ch4.7 : Différenciation variétale au stade T1 (ACP obtenue à partir des sciures).

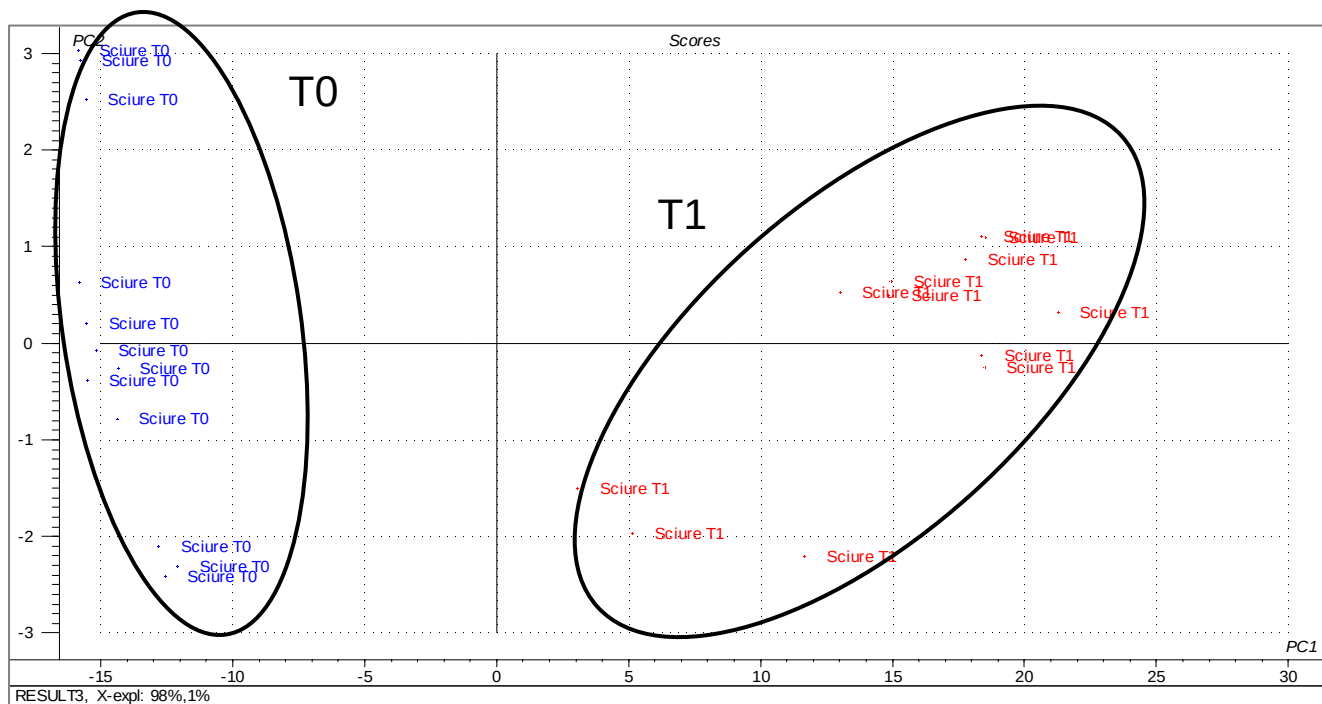


Figure III.Ch4.8 : Différenciation entre les stades de décomposition T0 et T1 pour le robinier (ACP obtenue à partir des sciures).

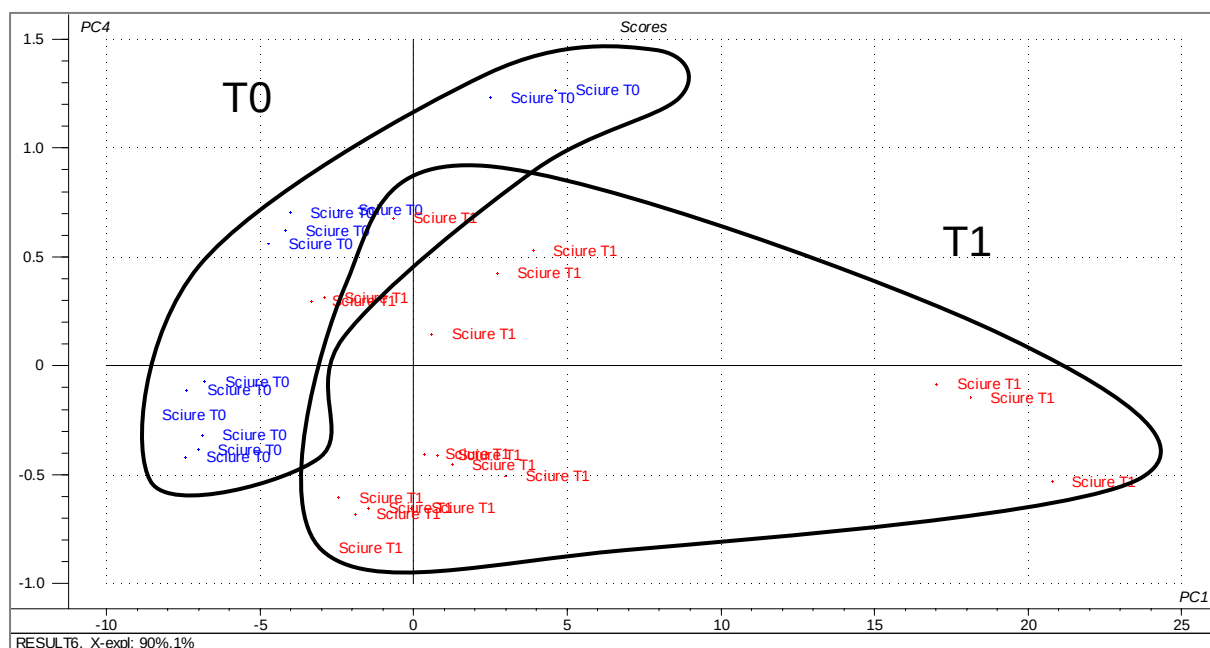


Figure III.Ch.4.9 : Différenciation entre les stades de décomposition T0 et T1 pour le frêne (ACP obtenue à partir des sciures)

L'influence du diamètre sur la perte en densité ou en eau n'est pas statistiquement significative d'après les mesures tomographiques. Cependant, il semble que l'effet diamètre se distingue sur les ACP des résultats obtenus par SPIR. Chez certaines espèces, on observe une nette distinction des diamètres avec une logique de distribution croissante entre les diamètres 03, 05, 08 et 10 cm, comme chez le robinier ou le chêne (Figure III.Ch4.10). Ceci est moins marqué chez le peuplier et le frêne.

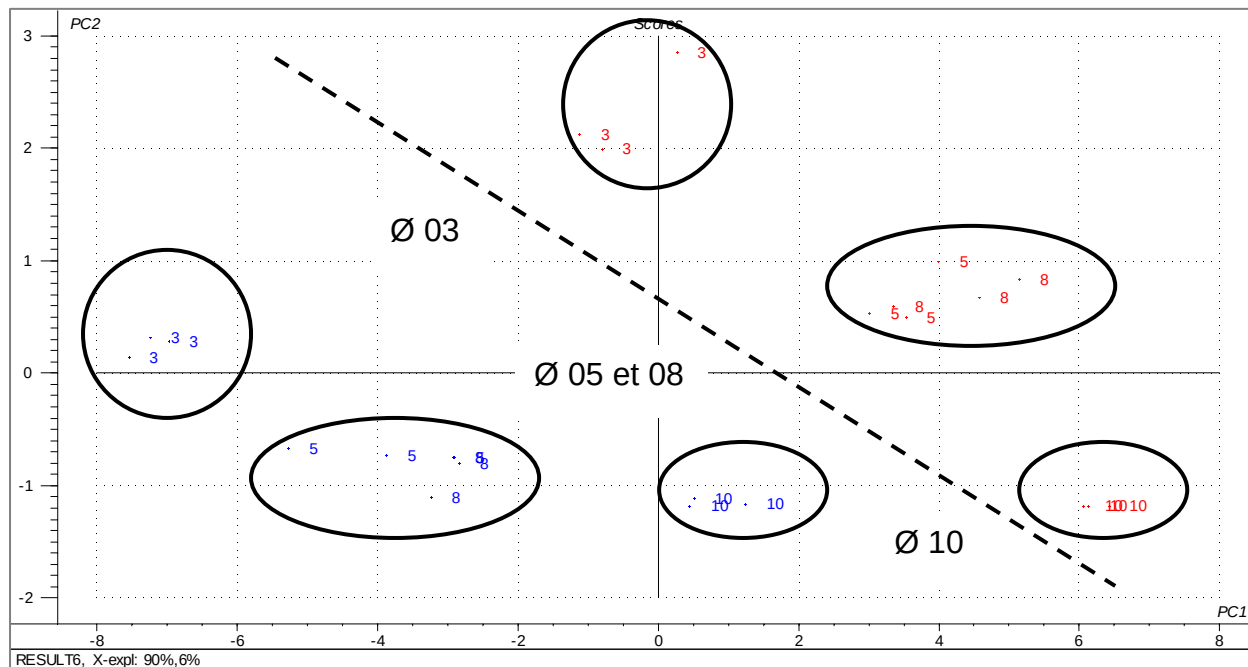


Figure III.Ch.4.10 : Différenciation entre les classes de diamètre (Ø en cm) pour le chêne au stade T0 et T1 (ACP obtenue à partir des sciures)

Les analyses faites sur les rondelles de bois n'ont été que partiellement traitées. D'après les premiers résultats, il semble que la distinction des états de décomposition chez les différentes espèces étudiées soit réalisable à partir des spectres effectués sur la moelle et sur le bois interne (aubier) des racines (Figure III.Ch4.11).

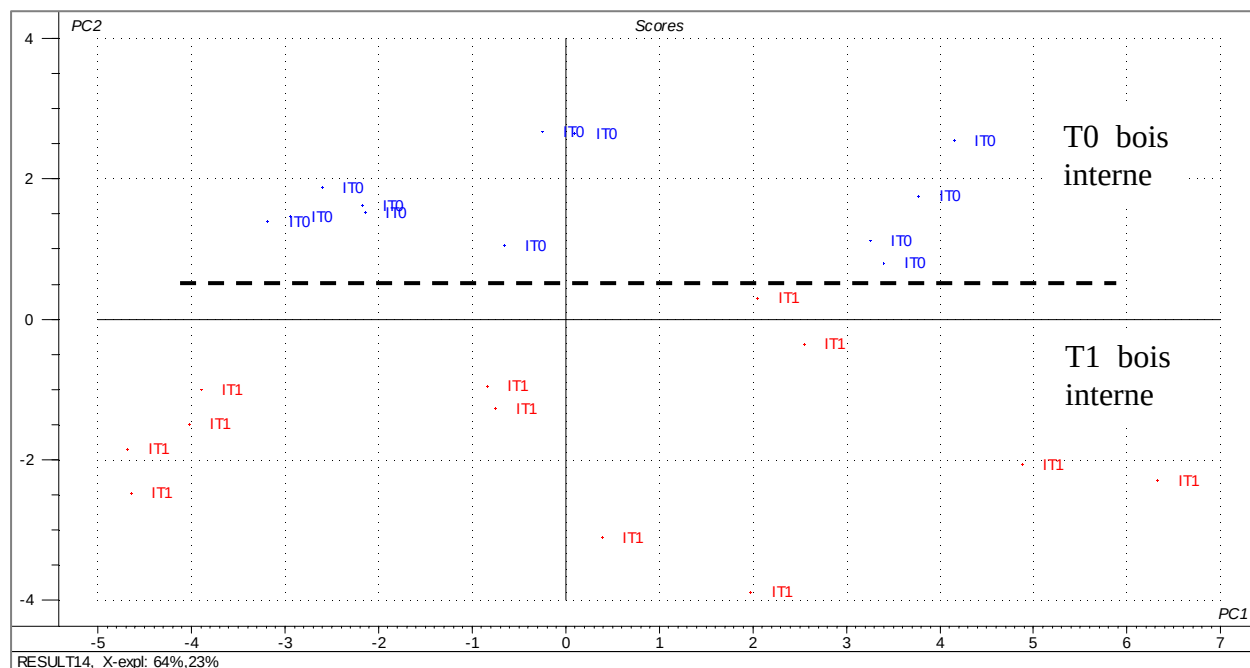


Figure III.Ch4.11 : Différenciation entre les stades de décomposition T0 et T1 sur le bois interne pour le chêne (ACP obtenue à partir des rondelles de bois)

Discussion

Ces premiers résultats nous permettent de voir l'évolution des racines après deux ans de décomposition.

1. Décomposition racinaire en fonction des espèces

- Le frêne a une densité élevée à T0 car c'est un bois dur et mi-lourd (Tableau III.Ch4.3). A T1, le frêne est l'espèce qui a la plus forte densité, il s'agit d'un bois dont les racines sont solides. Le frêne est l'espèce qui a le moins perdu en densité. Visuellement, les échantillons étaient dans un état de décomposition peu avancé et assez résistants à la pénétration du couteau. La densité du frêne est la plus élevée au stade T1 et c'est l'essence qui perd le moins en densité au bout des deux années de décomposition. Sa structure reste donc relativement dense.
- Le chêne est à T0 un bois dense, dur et mi-lourd (Tableau III.Ch4.3). A T1, il est également dans un état de dégradation peu avancé. Cependant, la perte en densité de ce bois est très forte entre T0 et T1 mais le chêne conserve sa structure.
- Le peuplier a la plus faible densité à T0, ce qui n'est pas surprenant car c'est un bois décrit comme étant naturellement très léger (Tableau III.Ch4.3). A l'état sain, c'est un bois qui perd beaucoup d'eau car il en consomme beaucoup et qui est gorgé de sève. Paradoxalement, à T1 c'est le peuplier qui a la teneur en eau la plus faible. Pourtant, sa densité est faible et ces échantillons étaient visuellement dans un état de décomposition avancé.
- Le robinier, à T0, est l'espèce qui a la densité la plus élevée car c'est un bois réputé imputrescible, très dur et lourd (Tableau III.Ch4.3). Toutefois, c'est l'espèce qui a le plus perdu en densité entre T0 et T1 car sa structure initialement solide est devenue fibreuse, c'est un bois à mauvaise résistance longitudinale qui se fend facilement car il est très nerveux. C'est l'espèce dont la teneur en eau est la plus élevée au stade T1 car sa structure fibreuse et spongieuse fait qu'il absorbe plus d'eau que les autres espèces. D'après la littérature (Tableau III.Ch4.3), le robinier est un bois à fort retrait hydrique et très nerveux, ce qui explique que la perte en eau après séchage entraîne une rétraction très forte du

bois, d'où l'apparition de fissures plus importantes. De ce fait, les pathogènes entrent plus rapidement jusqu'au cœur donc sa dégradation est plus rapide que les espèces où les pathogènes doivent progresser dans la masse du bois. Les champignons arrivent sous forme de spores transportées par l'eau. Visuellement, ce bois était dans un état de dégradation très avancé.

Globalement, les données issues de la littérature coïncident bien avec nos résultats (densité, dureté, rétractabilité, teneur en eau, propriétés mécaniques, résistance à la décomposition). Ceci révèle que les propriétés du bois aérien et racinaire sont semblables. Par contre, pour le robinier, on constate des différences entre les caractéristiques du bois de la partie aérienne et celles du bois racinaire, notamment sa faible résistance à la dégradation (alors que le bois de la partie aérienne est qualifié d'imputrescible). L'absence de duramen racinaire pourrait être un facteur explicatif.

	Robnier	Peuplier	Frêne	Chêne
Description du bois aérien	Bois jaune verdâtre à l'état frais, brunissant à la lumière. Hétérogène. Grain grossier, fil assez droit. Aubier étroit, gris jaunâtre	Duramen blanc, aubier non distinct. Structure homogène et fil généralement droit, formation importante du bois de tension. Grain fin.	Bois blanc jaune nacré. Grain assez grossier. Structure très hétérogène. Fine maillure sur quartier. Aubier non distinct	Bois de cœur jaune brunâtre fonçant à la lumière, fortement maillé sur quartier. Grain grossier, très droit. Structure hétérogène Aubier distinct blanchâtre
Densité	0,75 à 0,80	0,40 à 0,50	0,65 à 0,75	0,65 à 0,80
Dureté	Bois très dur mais se fend facilement	Très léger et tendre	Dur, mi-lourd	Bois mi-dur à dur, lourd
Rétractabilité	Retrait fort, bois très nerveux	Retrait moyen à fort. Bois nerveux	Retrait moyen à fort, moyennement nerveux	Retrait fort, bois nerveux
Teneur en eau (%)	-	52	29	35
Propriétés mécaniques	Bois imputrescible, très bonnes résistances axiales; élastique et résilient. Aubier non durable	Aubier et duramen non durables.	Excellentes propriétés mécaniques. Résiste bien en compression, très bien en traction et flexion. Élastique et très résilient. Peu fissile, assez adhérent	Excellentes résistances mécaniques, résiste bien en compression, très bien en flexion, assez résilient. Adhérent. Peu fissile dans le sens tangentiel faible cohésion dans le sens radial (gros rayons)
Agents de la décomposition	Très résistant aux champignons, résistant aux termites, le duramen résiste aux insectes mais pas l'aubier	Non résistant aux champignons, sensible aux termites, le duramen résiste aux insectes mais pas l'aubier	Non résistant aux champignons, sensible aux termites, le duramen résiste aux insectes mais pas l'aubier	Résistant aux champignons, moyennement résistant aux termites, le duramen résiste aux insectes mais pas l'aubier
Utilisation du bois	Piquets de clôtures, parquet, caillebotis et mobilier d'extérieur	Charpenterie, meubles, contre-plaqué, papier, allumettes, jouets	Meuble, plaquage, manches d'outils, menuiseries d'intérieur, tonnellerie, échelles, chevilles	Portes intérieures, meubles, menuiserie d'extérieur, bois de construction, bardage

Tableau III.Ch4.3 : Caractéristiques du bois des différentes espèces étudiées
(D'après <http://tropix.cirad.fr/tempere.html>, http://cnsl.naoonet.free.fr/construction_amateur/materiaux/essences.htm, <http://www.woodforum.be/fr/essences/robinier>).

D'après les résultats obtenus par SPIR, la différenciation variétale au stade T0 est clairement mise en évidence, avec rapprochement du peuplier et du frêne en raison de propriétés chimiques proches. Au

stade T1, on observe également une différenciation variétale mais moins nette avec rapprochement cette fois du frêne et du chêne. A ce stade, ce sont ces deux espèces qui présentent la plus forte densité et le plus faible niveau de dégradation apparent. Pour ce qui est de la différenciation entre les stades T1 et T0, elle est bien marquée pour le chêne, le robinier et le peuplier. Pour ces trois espèces, la perte en densité entre T0 et T1 est importante. En revanche, pour le frêne, la différenciation est moins nette. Il s'agit de l'espèce pour laquelle la perte en densité est la plus réduite et qui se trouve dans un état de décomposition peu avancé.

Ceci soulève l'existence éventuelle d'une corrélation entre les propriétés chimiques et la perte en densité du bois. Il serait nécessaire de poursuivre les investigations dans ces deux domaines pour confirmer cette hypothèse.

Si on compare les densités des échantillons du dispositif avec les densités des échantillons de racines de souches abattues en 2005, on voit que nos échantillons sont de densités inférieures et dans un état de dégradation plus avancé alors que la décomposition date de seulement deux ans.

Ces éléments mettent en avant le biais de notre méthode expérimentale qui est lié à la découpe des échantillons de racines qui induit une décomposition plus rapide. Les échantillons coupés sont affectés par les agents de la décomposition sur les sections coupées, ce qui ne se produit pas dans la réalité. De plus, les échantillons coupés sont déconnectés de la souche et ne bénéficient plus des défenses hormonales jouant le rôle de barrière de protection face aux attaques de champignons ou insectes.

Les racines des souches abattues en 2005 se décomposent moins rapidement dans la mesure où elles restent alimentées par la souche pendant quelques temps après la mort de l'arbre. Certaines racines peuvent même survivre et émettre des drageons ou rejets qui développent un nouveau système racinaire.

L'étude de la décomposition en conditions réelles nécessite de prendre en compte de très nombreux paramètres. Bien que plus complexe, le suivi de la décomposition de systèmes racinaires en place permettrait d'obtenir des informations plus justes et plus précises. En effet, la décomposition des racines est un phénomène qui dépend du type de matériaux dans lequel se trouve le système racinaire. Les matériaux limoneux retiennent l'humidité et permettent le développement des champignons tandis que les matériaux drainants (grossiers), sont plus sujets à des alternances d'humectation et de dessiccation (entraînant la fissuration du bois de certaines espèces). Le climat a également une influence majeure sur ce phénomène (température et pluviométrie).

2. Apports des méthodes d'étude de la décomposition racinaire : revue critique

2.1. Caractérisation qualitative et quantitative des racines

La technique des classes de dégradation utilisées pour caractériser la décomposition des racines est basée sur des critères physiques donc applicables à toutes les espèces et à toutes les classes de diamètre. L'utilisation de ces classes in situ a été un outil rapide et utile pour comparer l'état de dégradation des racines. Globalement, les résultats obtenus sont cohérents avec les densités obtenues par tomographie ainsi qu'avec les analyses spectroscopiques, à l'exception du chêne qui présente une forte perte en densité entre les états T0 et T1 mais sans qu'il y ait de changement notable de la structure du bois. La caractérisation visuelle de la décomposition n'est donc pas toujours suffisante pour caractériser l'état de dégradation.

Le test de pénétrométrie au couteau n'a finalement pas été exploité, car dans notre cas cette méthode présente un biais. Le même couteau (même longueur de lame) a été utilisé quelle que soit la classe de diamètre des échantillons (2 à 10 cm). Par conséquent, un certain enfoncement de la lame du couteau n'a pas la même signification en termes de dégradation pour un diamètre de 2 cm que pour un diamètre de 10 cm. Il faudrait comparer des échantillons de même diamètre avec cette technique et plutôt au sein d'une même espèce car les caractéristiques mécaniques sont différentes entre espèces et influent sur la pénétration du couteau. De plus, la dureté du bois est influencée par sa teneur en eau. D'autre part, certains échantillons ont des fissures ce qui fausse le test. On pourrait remplacer le test de pénétrométrie au couteau par un pénétromètre calibré portatif.

2.2. Tomographie RX

Les densités obtenues s'avèrent être cohérentes par comparaison avec les densités obtenues par déplacement d'eau. Sur les images tomographiques de bois séché, les zones de pourriture se caractérisent par une faible densité, due à une dégradation du bois entraînant des pertes de masse importantes pour les zones atteintes. Les zones de pourriture sont faciles à détecter sur les images tomographiques car elles correspondent à des zones de vides sur l'image. Cependant, pour certaines espèces, lorsque la densité de ces zones est presque égale à la densité de l'air ($H = -1000$ unités Hounsfield), il est difficile d'observer la structure résiduelle (fibres, cubes...) de l'échantillon. De plus, sur les petits diamètres (02 et 03 cm), la résolution des images est médiocre (moins bonne différenciation des cernes, des détails structurels...).

Le tomographe RX est un outil intéressant pour la détermination de la densité de façon précise, pour la visualisation interne des échantillons. Cependant, cette technique est plus efficace sur du bois sain et dense que sur du bois en décomposition de densité plus hétérogène.

2.3. SPIR

Les spectres issus des rondelles de bois sont de moins bonne qualité, notamment pour le bois décomposé, en raison d'une structure possédant trop d'imperfections physiques (rugosité trop élevée) qui brouillent le signal. D'autre part, les parties internes et externes (aubier/cœur), sont difficilement délimitables à l'œil nu, laissant des incertitudes sur le positionnement du faisceau PIR. Par ailleurs, la présence de l'écorce, dont la structure chimique diffère très fortement du reste de l'échantillon, interfère avec le signal en raison d'une trop forte hétérogénéité de composition chimique. La forte sensibilité du SPIR fait que cette technique est certes précise pour la différenciation chimique mais nécessite que l'échantillon soit sous une forme physique homogène. La sciure semble donc plus adaptée en SPIR pour travailler sur du bois en décomposition.

Conclusion provisoire

L'objectif des investigations sur la décomposition racinaire est d'évaluer le temps à partir duquel il y a apparition de risques pour les ouvrages hydrauliques. La perte en densité induit une déstructuration des racines, créant des zones d'hétérogénéités au sein des remblais. L'alternance de périodes d'humectation et de dessiccation accélère la dégradation racinaire notamment pour des bois à fort retrait hydrique. D'après nos résultats, la vitesse de décomposition des échantillons coupés n'est pas influencée par le diamètre des racines mais dépend fortement des espèces végétales. Le robinier semble être l'espèce dont les racines se dégradent le plus rapidement en raison de sa structure fibreuse. Le peuplier est un bois léger et peu résistant. Pour ces deux espèces, après deux ans de dégradation, le degré de décomposition est susceptible de présenter un danger pour l'ouvrage. Le frêne et le chêne ont un bois résistant qui ne présente que peu de changement de structure par rapport à l'état sain.

Les conditions expérimentales n'ont pas permis l'observation de la mise en place des galeries, liés à la dégradation complète du bois. Ceci est dû au fait que les échantillons ont été enterrés et ne se sont donc pas développés dans ce milieu. En effet, les racines durant leur développement et leur croissance en diamètre compactent les matériaux alentours. Dans les matériaux cohésifs nous avons observé sur le terrain, lors de l'excavation de souches pourries, le maintien de l'empreinte des racines décomposées dans le remblai.

Deux années de décomposition semblaient à priori un délai court pour observer le phénomène de décomposition racinaire. Or, il s'est avéré que des transformations importantes avaient déjà affecté les racines de certaines espèces. En conditions réelles, la dégradation des racines est probablement plus lente et plus hétérogène pour une même souche. Aussi, les valeurs que nous avons obtenues à ce jour peuvent être considérées comme minorantes, ce qui est déjà un résultat intéressant si on souhaite aller dans le sens de la sécurité.

4.3. Conclusions du projet d'article et perspectives

Les résultats obtenus par le biais de cette expérimentation n'ont pas été pleinement exploités. De nombreuses analyses restent à faire et d'autres données à acquérir. Un travail encore important est nécessaire pour permettre la publication du projet d'article dans une revue à comité de lecture.

Le dispositif implanté sur la digue de Castérino (contenant du mélèze et du pin sylvestre) sera déterré en juin 2011. La méthodologie développée dans le cadre du stage de Sophie Ferrat sera appliquée afin d'obtenir des résultats comparables entre espèces pour 2 années de décomposition.

Les prochaines campagnes de déterrage du dispositif implanté sur la digue de l'Isère, devraient avoir lieu dans 5/6 ans (T2) et 10 ans (T3). Les résultats présentés précédemment laissent supposer que d'ici 3 ans, le bois de certaines espèces (robinier et peuplier) sera probablement totalement décomposé.

La tomographie RX s'est avérée être une technique efficace et précise. L'acquisition des densités pourra éventuellement être effectuée par déplacement d'eau (technique moins chronophage et au coût réduit). La SPIR semblent pouvoir fournir des résultats très intéressants. Les investigations dans ce domaine seront poursuivies en 2011 dans le cadre d'un partenariat entre le Cemagref et le laboratoire des Systèmes Chimiques Complexes de l'Université de Saint-Jérôme. L'objectif sera dans un premier temps d'effectuer une cartographie précise (réalisée avec un spectromètre à microscope moyen infra-rouge) sur des rondelles de racines saines de 1 cm d'épaisseur maximum, poncées et planes. Ceci permettra de caractériser les différentes zones des racines (moelle, bois interne et écorce) afin de connaître les zones les plus sensibles à la dégradation et la cinétique de création des galeries (par conservation de l'écorce par exemple). Dans un deuxième temps, il est prévu d'alimenter la banque de données constituée des différenciations chimiques faites par le SPIR sur les échantillons T0 et T1 du dispositif, afin d'établir un modèle pouvant prédire l'avancement de la décomposition des racines en fonction du temps, des espèces et des diamètres.

Afin d'obtenir des données précises et représentatives de la réalité, la banque de données devra être enrichie en analysant des souches en décomposition abattues à des dates différentes. Ce travail devra donc être effectué en collaboration avec les gestionnaires de digues qui répertorient ces informations dans leur plan de gestion depuis une dizaine d'années pour certains.

L'excavation des souches, méthode lourde et destructrice pour les arbres ainsi que pour les ouvrages, a été nécessaire pour toutes les études présentées précédemment. Les techniques non destructives pouvant permettre la détection des systèmes racinaires et la distribution de leurs racines présentent un grand intérêt pour de nombreux chercheurs mais également pour les gestionnaires d'ouvrages ou de parcs arborés. Diverses techniques existent mais ne sont pas efficaces. Les méthodes électriques, basées sur les mesures de résistivité ou de conductivité des matières, semblent ouvrir des pistes pour la détection des racines.

Chapitre 5

Détection des systèmes racinaires

SOMMAIRE

5.1. Présentation de l'article V	138
5.2. Rappels des propriétés électriques des matériaux.....	138
5.3. Article V: Detection of buried tree root samples by electrical measurements.....	140
5.4 Conclusions de l'article et perspectives	151

Statut de l'article V

Accepté le 09/08/2010 pour publication dans la revue *Plant and Soil* (IF : 1.9)

5.1. Présentation de l'article V

Cet article est le résultat d'une collaboration entre le Cemagref d'Aix-en-Provence et le Laboratoire de géophysique de l'Université de Clausthal, dans le cadre du projet Franco-Allemand « PROCOPE » sur les méthodes géophysiques de détection de l'érosion interne dans les ouvrages hydrauliques en remblai.

Les mesures expérimentales, objets de l'article, ont été réalisées au Cemagref d'Aix en Provence, au sein du LERMI (Laboratoire d'Essais et de Recherches sur le Matériel d'Irrigation) entre le 20 et le 24 Octobre 2008 sous la direction d'Andreas Weller (Géophysicien de l'université de Clausthal).

L'objectif de ces travaux était de caractériser précisément le signal électrique des racines enfouies, en fonction de l'espèce végétale, de l'orientation des échantillons de racines et du type de matériaux, par des mesures de résistivité électrique complexe et de polarisation provoquée (ou PSI – Polarisation Spectrale Induite).

Il s'agissait d'une étape préliminaire avant de procéder aux essais de détection des racines in situ, l'objectif étant à terme de pouvoir détecter les racines potentiellement dangereuses dans les ouvrages hydrauliques. Les essais de détection sur le terrain n'ont pu être réalisés dans le cadre de la thèse.

5.2. Rappels des propriétés électriques des matériaux

Nous allons rappeler les différentes terminologies relatives à la caractérisation des propriétés électriques des matériaux.

Les matériaux se comportent à la fois comme des conducteurs électriques mais aussi comme des diélectriques (isolants). Pour rendre compte de cette aptitude à se laisser traverser par un courant électrique et à se polariser, on introduit alors les concepts (interchangeables) de conductivité électrique complexe, σ^* , de résistivité complexe, ρ^* , ou encore de permittivité complexe ε^* (Ruffet et al. 1991) :

$$\sigma^* = \frac{1}{\rho^*} = i\omega\varepsilon^* \quad (1)$$

Avec ω : la pulsation et $i^2 = -1$. On notera que ces propriétés complexes mesurées peuvent s'écrire en termes d'amplitude et de phase ou encore en termes de partie réelle ou de partie imaginaire. Par exemple, on a pour la conductivité complexe :

$$\sigma^* = |\sigma|e^{i\phi} = \sigma' + i\sigma'' \quad (2)$$

La partie réelle σ' est associée à la conduction des charges électriques dont la direction est en phase avec le champ électrique appliqué $\vec{E}$. La partie imaginaire σ'' est liée aux courants de déplacement qui sont déphasés de 90° par rapport au champ électrique appliqué. Une des difficultés majeures de la comparaison des données issues de la bibliographie tient à l'utilisation par les auteurs d'une des trois grandeurs σ^* , ρ^* et ε^* , qui reposent sur les mêmes

phénomènes physiques. Toutefois, dans les domaines des hautes fréquences, l'emploi du concept de permittivité complexe est privilégié, alors que dans le domaine des basses fréquences, on préfère utiliser la conductivité ou la résistivité complexe.

Les fréquences supérieures à 100 Hz n'étant pas appropriées pour des expériences de terrain, du fait de la déformation des mesures par les effets de couples électromagnétiques, nous avons utilisé, dans le cadre de cette étude, du courant électrique basse fréquence.

Outre la conduction électrolytique (conduction des charges électriques dans le liquide interstitiel), les mécanismes mis en jeu au niveau microscopique dans le domaine des basses fréquences sont (a) les transferts de charges ou d'ions en solution à l'interface électrode/électrolyte (ou encore le phénomène de polarisation dit d'électrode) et (b) les interactions physico-chimiques entre les ions en solutions et la surface des minéraux. La première classe de mécanismes est considérée comme un phénomène parasite qu'il convient de minimiser grâce à l'emploi de systèmes dits à 4 électrodes et à l'utilisation d'électrodes impolarisables. Très schématiquement, la seconde classe de mécanismes recouvre à la fois (i) les transferts de charges à la surface des minéraux (la conduction dite de surface), (ii) les phénomènes de polarisation dus à la redistribution locale des cations compensateurs, et enfin (iii) les interactions entre les ions mobiles en solution dans le liquide interstitiel et les cations compensateurs.

Le bois sec est un excellent diélectrique. La résistivité électrique du bois dépend de l'espèce végétale, de la densité et de la teneur en eau. Elle diminue avec l'augmentation de la teneur en eau et de la densité du bois. (Weatherwax and Stamm 1945).

Dans le cadre des basses fréquences, l'influence de la teneur en eau, sur les propriétés complexes σ^* et ρ^* n'est pas encore bien caractérisée dans la littérature scientifique. Si la teneur en eau a un effet mineur sur les variations de σ' avec la fréquence, son influence sur la partie imaginaire σ'' reste encore inconnue.

5.3. Article V: Detection of buried tree root samples by electrical measurements

Detection of buried tree root samples by using geoelectrical measurements: a laboratory experiment

C. Zanetti · A. Weller · M. Vennetier · P. Mériaux

Received: 18 February 2010 / Accepted: 7 September 2010 / Published online: 22 September 2010
© Springer Science+Business Media B.V. 2010

Abstract The aim of this study was to test the possibility of using geoelectrical measurements to detect and differentiate different root samples of trees rooted in dikes. A laboratory experiment was performed to describe the electrical signal of buried freshly cut root samples according to tree species, root sample orientation and number and nature of earthfill

materials. The geoelectrical measurements were performed at the soil surface in containers. First, the electrical properties of three soil materials (gravel, sand and silt) were characterized in containers without buried roots. In subsequent steps, the root samples were buried at a depth of 0.05 m with different orientations: horizontally and parallel or perpendicular to the electrode array, and vertically. The complex conductivity spectra were observed in the frequency range 22.9 mHz–750 Hz. The measurements without buried roots were repeated after completing all the measurements with the roots. In most cases, the conductivity of buried root samples increased the integral conductivity of the ground. This trend was observed mainly in gravel and sand. The parallel orientation resulted in the most significant increase of the real part of conductivity. Channelling of the current flow in the root seems to be a reliable explanation. This laboratory experiment now opens the way for in-situ measurement.

Responsible Editor: Hans Lambers.

C. Zanetti (✉) · P. Mériaux
Cemagref, Hydraulics engineering and hydrology RU,
3275 route de Cézanne, CS 40061,
13182 Aix-en-Provence, cedex 5, France
e-mail: caroline.zanetti@cemagref.fr

A. Weller
Institut für Geophysik, Technische Universität Clausthal,
Arnold-Sommerfeld-Str. 1,
38678 Clausthal-Zellerfeld, Germany

M. Vennetier
Cemagref, Mediterranean ecosystems
and associated risks RU,
3275 route de Cézanne, CS 40061,
13182 Aix-en-Provence, cedex 5, France

C. Zanetti
Université de Provence,
29 av Robert Schuman,
13100 Aix-en-Provence, France

M. Vennetier · P. Mériaux
ECCOREV FR 3098, Université Aix-Marseille,
Marseille, France

Keywords Root detection · Electrical measurements · Induced polarisation · Wood electrical properties · Earth dike materials

Introduction

Trees growing on earth dikes generate safety problems and can reduce dike durability (Mériaux and Royet 2007; Vennetier et al. 2005; Zanetti et al. 2008). Root

systems can penetrate the body of the dike and generate internal and external erosion risks. Tree roots can grow to great lengths (>10 m), thicknesses (5 to 30 cm in diameter) and depths (more than 4 m). On flood protection dikes, root systems often take up the entire depth and width of the dike (Mériaux et al. 2006). Many studies have presented results on root systems on river banks, forest and cultivated soils and on mountains (Abernethy and Rutherford 2001; Danjon et al. 2008; Doussan et al. 1998; Dupraz et al. 1999; Fitter 2005; Stokes 2002; Stokes et al. 1996) but there are few references relating to root systems in dikes in the literature. Moreover, poplar (*Populus Sp.*) and willow (*Salix Sp.*) root characteristics are well known (Barsoum 2001; Karrenberg et al. 2003; Lite and Stromberg 2005) unlike those of black locust (*Robinia pseudo acacia*), maple (*Acer Sp.*), ash (*Fraxinus Sp.*) and oak (*Quercus Sp.*) which are very common on earth dikes.

Until now, the only solution for acquiring precise knowledge of a root system has been to excavate it or to remove the earth around it with water or air at high pressure. However, these solutions are destructive for both trees and dikes, time consuming and quite expensive. They cannot always be implemented due to safety reasons, particularly on dikes with a permanent head. Many protocols for studying and measuring properties of uprooted trees have been published (Bischetti et al. 2005; Danjon and Reubens 2008; Doussan et al. 1998; Fitter 2005; Gärtner and Denier 2006; Khuder et al. 2007; Pagès 1996). However, attempting to describe large undisturbed underground root systems very precisely is difficult. Non-destructive techniques such as ground penetrating radar (Butnor et al. 2001; Cermak et al. 2000; Hruska et al. 1999; Stokes et al. 1999; Wielopolski et al. 1999) and electrical tomography (Al-Hagrey 2007; Heeraman et al. 1997; Petersen and Al-Hagrey 2009) or a combination of these different tools (Amato et al. 2008; Nadezhdina and Cermak 2003; Zenone et al. 2008) have been used. Radar is not adapted as clayey material strongly attenuates the electromagnetic signal and coarse fragments generate numerous echoes.

Electrical resistivity tomography using multi-electrode arrays on the surface or in small boreholes can be successfully applied to generate images of root zones reflecting their spatial variability and to quantify their biomass (Amato et al. 2008; Amato et al. 2009; Petersen and Al-Hagrey 2009) or to study the water flow in soil and plants (Pagès et al. 2000).

Other applications of electrical resistivity tomography using ring electrode arrays around a trunk aim at a detailed investigation of living trees (Al-Hagrey 2006; Nicolotti et al. 2003; Weihs et al. 1999). The resulting horizontal cross-sections of the conductivity distribution can be used to monitor the sap flow and to recognise decay processes in the trunk.

The investigation of an entire root system by electrical measurements is not realistically conceivable due to soil heterogeneity, seasonal variations of water content and sap flows and different properties of wood according to species and root dimensions. However, in the framework of ensuring dike safety, it should be useful to at least assess the direction, length and depth of the main roots at affordable costs, and in particular determine whether certain roots cross through the entire dike body.

The spectral induced polarisation (SIP) method is an extension of the conventional geoelectrical method. The phenomenon of polarisation of the ground was discovered by Conrad Schlumberger (1920) during his first geoelectrical direct current measurements. He noticed that the slow decay of the voltage measured between two potential electrodes could not be completely explained by the inertia of the pointer of galvanometers as they were used in the 1920s. The capacitive behaviour of the ground causes charging when the electric circuit is closed and discharging when current flow is switched off. This phenomenon, which is known in the discipline of electrochemistry as electrode polarisation, occurs when a transition between electronic and electrolytic conduction takes place. To enable current flow, a chemical reaction has to commence that hinders the current flow and results in the appearance of an overvoltage. When the current flow is switched off, the overvoltage degrades. If a sinusoidal alternating current is used, induced polarisation (IP) can be observed by a frequency dependence of the resistivity amplitude or by a phase shift between the injected current signal and the resulting voltage signal. The strength of polarisation can be expressed by the frequency effect that characterises the comparative change of the conductivity amplitude which is measured at two different frequencies. The extent of the phase shift can also be an applicable indicator for the strength of the polarisation effect. Generally, the complex electrical conductivity, which is described either by amplitude and phase angle or by a real (in-phase) and an imaginary (out-of-phase) component, varies with frequency. A complete characterisation of the electrical

behaviour of a material can only be achieved by investigating the behaviour of the complex electrical conductivity over a wide frequency range. The SIP method yields both the spectra of conductivity amplitude and phase shift in a predefined frequency range. Higher frequencies, especially in field measurements, are affected by electromagnetic coupling effects. For lower frequencies, the increasing time expense marks a limit. IP phenomena of inorganic matter are caused either by metallic mineral particles in a rather poorly conducting matrix or by differences in the ion concentrations in the pore space and at the interface between matrix and pore space (Weller et al. 2000). IP effects may also be observed in the presence of organic material. Schleifer et al. (2002) and Weller et al. (2006) reported the successful application of SIP for identifying wooden relics in peat bogs. The polarisation effect of wood is caused by differences in the mobility of ions at cell membranes that hinder the electrolytic current flow and result in a separation of charge carriers of different polarity (polarisation). Laboratory investigations on a variety of wood samples have shown strong variations in the strength of polarisation depending on sample orientation, species and distance from the trunk (Martin 2009a; Weller et al. 2006). Martin (2009b) describes the application of complex resistivity tomography on living trees that integrates IP effects in tomographic measurements. Laboratory investigations on infected wood samples have shown that beside the conductivity amplitude the phase shift is also altered by certain wood diseases. Up to now, SIP investigations on root samples have not been reported.

The aim of this study was to characterize root samples of trees commonly found on dikes in various materials. Since we foresaw difficulties in carrying out a field experiment due to uncontrolled factors, we started with tests using the SIP method in the laboratory under controlled conditions. The experiment allowed describing the electrical signal of buried tree root samples according to sample orientation, number and burying depth and to the type of embedding dike material.

Material and methods

Origin of root samples and characterisation

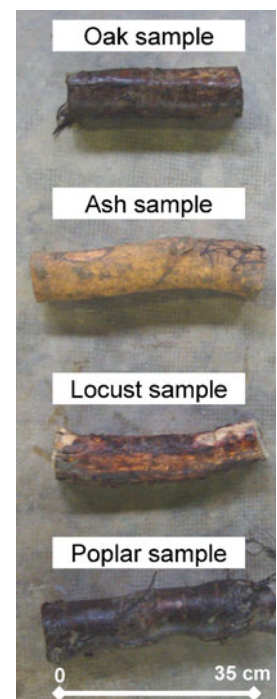
Thirty six samples, 35 cm in length with complete structure (wood and bark), were selected on stumps

(30–50 years old) extracted from Loire river dikes (France) in October 2008. The species studied were those most common on French dikes: poplar (*Populus hybrida*), black locust (*Robinia pseudoacacia*), oak (*Quercus robur*), ash (*Fraxinus excelsior*), maple (*Acer negundo*) and willow (*Salix alba*). Three samples were chosen in two diameter classes for each species: 3–4 and 6–7 cm (Fig. 1). Samples were kept in hermetic plastic bags in a refrigerator until the beginning of the experiment for ten days after their extraction from the dikes to preserve their water content and electrical properties.

First, the conductivity of all the samples was determined by electrical measurements using an instrument operating at a frequency of 4.3 Hz to investigate the variation and the dependence on water content and sample diameter. For each sample, two nails, spaced at 0.1 m, were knocked into the bark and two others were nailed into each side of the heartwood (Fig. 2). The geometric factor considers the area of cross-section of the samples and the distance of the potential electrodes.

The water content of each root sample was estimated by the difference between fresh and dry weight. Fresh weight was measured before the experi-

Fig. 1 Some of the large root samples used for the experiments



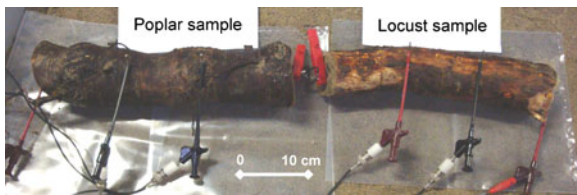


Fig. 2 Example of electrical measurements on two large root samples

ments in the laboratory. Dry weight was measured after drying in an incubator at a temperature of 50°C for five days.

Preparation of samples and containers

Large plastic containers (1.1 L×0.9 W×0.6 Dm³) were filled with three types of dike material extracted from local quarries: silt (U), sand (S) and gravel (G). Materials were put in containers with a tractor. Layers of approximately 20 cm were added and compacted with a shovel. Large containers were used to avoid edge effects during the measurements. Each box was filled with 0.5 m³ of material, weighing approximately 1000 kg. The containers were placed inside a shed in order to guarantee nearly constant temperature and moisture conditions during the experiment.

Characterisation of the material in the containers

For each type of material, we measured the grain size distribution (by humid and dry sieving, mesh sieve of 1 mm to 80 µm—Standard NF P 94-056) then sedimentation analyses (by measuring particles concentration with a densitometer—Standard NF P 94-057), the water content (by gravimetric method—Standard NF P 94-050) (Table 1 and Fig. 3). Gravel are composed by more than 50% of pebble, sand by more of 50% of sand and silt by more of 50% of silt. Complex electrical conductivity spectra were investigated in a frequency range from 22.9 mHz to 750 Hz.

Measurements of complex conductivity

The simultaneous occurrence of electrical conduction and dielectric displacement leads to the definition of an effective conductivity σ^* (Olhoeft 1985; Weller et al. 2000). This complex quantity with frequency-

dependent real part σ' and imaginary part σ'' includes conduction as well as polarisation phenomena and is given by

$$\sigma^*(\omega) = \sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega) \quad (1)$$

with ω being the angular frequency and i the imaginary unit. The commonly measured quantities conductivity amplitude $|\sigma^*|$ and phase angle φ are related to real and imaginary part of conductivity according to the following expressions:

$$|\sigma^*| = \sqrt{(\sigma')^2 + (\sigma'')^2} \quad (2)$$

and

$$\tan \varphi = \frac{\sigma''}{\sigma'} \quad (3)$$

The commonly measured conductivity amplitude and phase values can be converted into the real and imaginary parts of conductivity according to the following relations:

$$\sigma' = |\sigma^*| \cos \varphi \quad (4)$$

and

$$\sigma'' = |\sigma^*| \sin \varphi. \quad (5)$$

The SIP measurements were performed at the surface of soil in containers in an inverse Wenner configuration with an electrode spacing of 0.1 m (Fig. 4). Complex conductivity spectra were observed in a low frequency range between 22.4 mHz and 750 Hz using a SIP Fuchs equipment (Radic Research, Germany). First, the electrical properties of the soil material in all the containers were characterized without buried root samples and the spectra of a selected single large sample (6–7 cm in diameter) of the species poplar, locust, oak and ash were investigated using the electrode geometry shown in Fig. 2. The resulting complex conductivity spectra of the four different root species are displayed in Fig. 7. The values of both real and imaginary part of conductivity at a frequency of 1.43 Hz are compiled in Table 3.

In subsequent steps, the root samples were buried with their upper margin at a depth of 0.05 m in different orientations: (a) parallel to the electrode array (longitudinal, Fig. 5), (b) perpendicular to the

Table 1 Water content, grain size distribution and electrical conductivity of the materials in the containers at 1.46 Hz (G=gravel / S=sand / U=silt)

Material name	G1	G2	S1	S2	U1	U2
Material water content (%)	5.1	5.2	6	6.5	14.6	15.6
Granulometry / sedimentology						
Stone>20 mm (%)	0	0	0	0	0	0
Pebble>5 mm (%)	59	58	9	9	2	1
Sand>50 μ m (%)	36	37	75	87	11	11
Silt>2 μ m (%)	4	4	12	3	57	62
Clay<2 μ m (%)	1	1	4	1	30	26
Conductivity in mS/m						
Real part	1.527	1.625	1.484	1.256	7.560	8.141
Imaginary part	0.00554	0.00572	0.00894	0.00850	0.0245	0.0285

electrode array (transversal, Fig. 6), and (c) vertically. One or three samples (laid next to each other) of each species (poplar, locust, oak and ash) were used. The measurements without buried roots were repeated after completing all the measurements with the roots. The spectra acquired before and after the root experiments showed a slight increase in the conductivity level caused by watering of the electrodes in order to lower their contact resistance. The values measured before and after the root experiments were averaged to obtain a reference level.

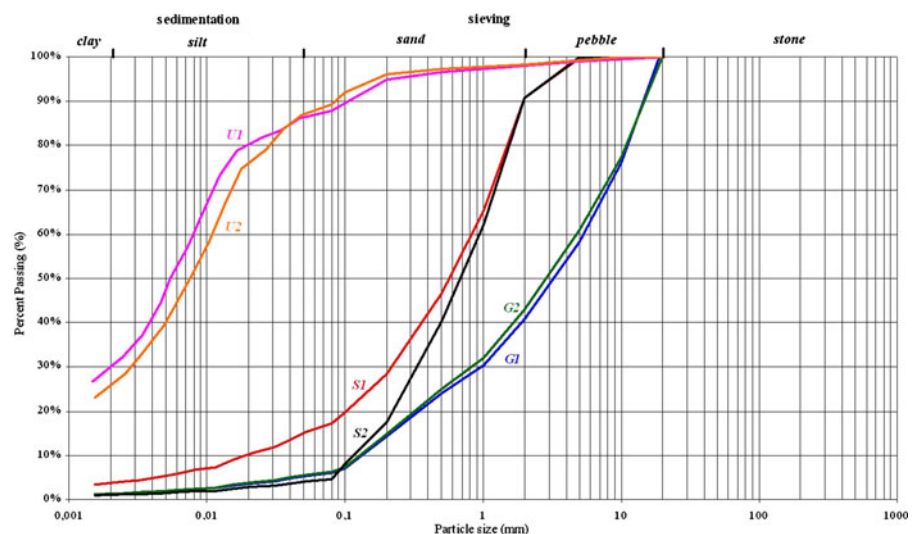
Results

The conductivity of root samples varied according to diameter and species (Tables 2 and 3). Willow and poplar exhibited the highest mean conductivity, maple

and oak gave intermediate values while ash gave the lowest ones. For locust, a considerable difference between samples of smaller (3–4 cm diameter) and larger (6–7 cm diameter) diameters could be observed. Whatever the species, a good correlation between conductivity and water content was seen ($r^2=0.87$ and 0.58 for respectively large and small samples).

As the imaginary part of conductivity is a good indicator of the membrane polarisation effect in wooden material (Weller et al. 2006), Table 3 suggests that polarisation was strongest for poplar, followed by ash. Locust and oak were characterized by low polarisation effects.

The grain size distribution curves of the two gravel and the two silt containers respectively were close to each other, as were their water contents. Consequently, their electrical properties were similar in each pair of containers. The sand samples exhibited slightly different

Fig. 3 Grain size distribution curves of the materials in the six containers

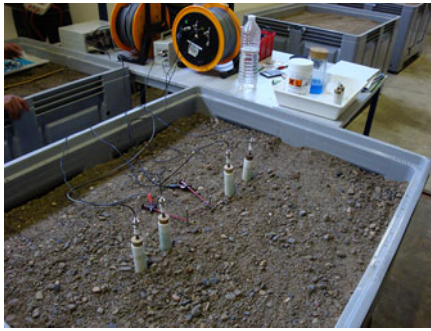


Fig. 4 Electrode positions at the soil surface in a container

grain size distributions with a higher proportion of clay and silt in container S1. This result was in agreement with the higher values of both the real and imaginary parts of conductivity in this container. Regarding the electrical properties of the material, only small differences between the gravel and sand were observed. Whereas the real part of the conductivity can be estimated by conductivity amplitude, the imaginary part of the conductivity is closely related to polarisation phenomena. The slightly higher conductivity amplitude of gravel may be caused by lower porosity. The imaginary part of conductivity reflects the increase of specific internal surface with decreasing average grain size (Börner et al. 1996; Weller et al. 2010).

In most cases, the buried wood increased conductivity, particularly in gravel and sand because the higher conductivity of buried root samples increased the integral conductivity of the ground. The orientation of root samples in parallel with the electrode array resulted in the most significant increase of the real part of conductivity.

Table 4 summarises the results of all the experiments. A conductivity ratio was determined considering the measurements with and without buried root samples at a frequency of 1.46 Hz. Regarding the longitudinal



Fig. 6 One oak sample in transversal orientation

samples in gravel, the highest increase of the real part of conductivity (ratio=1.795) was observed for poplar, followed by oak (1.503), ash (1.406) and locust (1.352). In sand, a slightly different order of ratios was obtained; the strongest effect was again caused by the poplar root sample. For oak and ash, the use of three instead of one root sample slightly increased the effect. Since the contrast in conductivity between wood and silt was lower, the effect of root samples on the real part of conductivity was reduced.

The imaginary part of conductivity was closely related to polarisation phenomena. The investigation of soil material showed weak polarisation effects for gravel and sand. The polarisation was stronger for silt. The imaginary part of the conductivity was higher when root samples were buried in the soil in most of our experiments and for the whole frequency range investigated. This increase depended on the soil type, the species and orientation of the root samples. The spectra of the four root species, which are displayed in Fig. 7, show a moderate frequency dependence. The real part of conductivity increases with rising frequency. The imaginary part of conductivity reveals a more complicated behaviour that depends on the



Fig. 5 Three ash samples in longitudinal orientation

Table 2 Water content and mean conductivity (with standard error) of root samples of different species

Diameter	Water content (%)		Mean Conductivity (mS/m)	
	3–4 cm	6–7 cm	3–4 cm	6–7 cm
Species				
Ash	49.33	51.32	10.54±0.77	12.75±0.19
Locust	65.01	59.05	23.85±2.99	12.99±1.52
Maple	63.09	60.45	23.34±4.88	19.13±1.15
Oak	51.94	52.22	19.86±1.77	15.78±3.58
Poplar	61.22	62.29	46.93±11.42	26.30±4.86
Willow	75.63	80.59	38.84±6.33	62.00±22.89

Table 3 Real and imaginary parts of conductivity at 1.46 Hz of four root samples

	Complex conductivity at 1.46 Hz in mS/m	
	Real part	Imaginary part
Poplar	20.4	0.424
Locust	15.2	0.118
Ash	12.6	0.265
Oak	19.9	0.115

root species. A local maximum at 0.2 Hz is observed for the ash sample. The oak and locust samples are characterised by a continuous increase with frequency. The largest values of imaginary part of conductivity are observed for the poplar sample. The strong increase at frequencies > 10 Hz, which is observed for all samples, may be attributed to electromagnetic coupling effects.

The spectra of buried poplar roots show a clear maximum of imaginary part of conductivity close to 1 Hz. A considerable difference with the response of the embedding material was observed around this frequency. The longitudinal orientation resulted in a strong effect reaching a multiplication factor of 9.8 in gravel. The measurable effects in sand and silt were still considerable for both longitudinal and transversal orientations. In comparison with poplar, all the other species exhibited only weak to moderate effects. For

ash and oak in longitudinal orientation, the response was more than doubled in gravel (Table 4).

Discussion

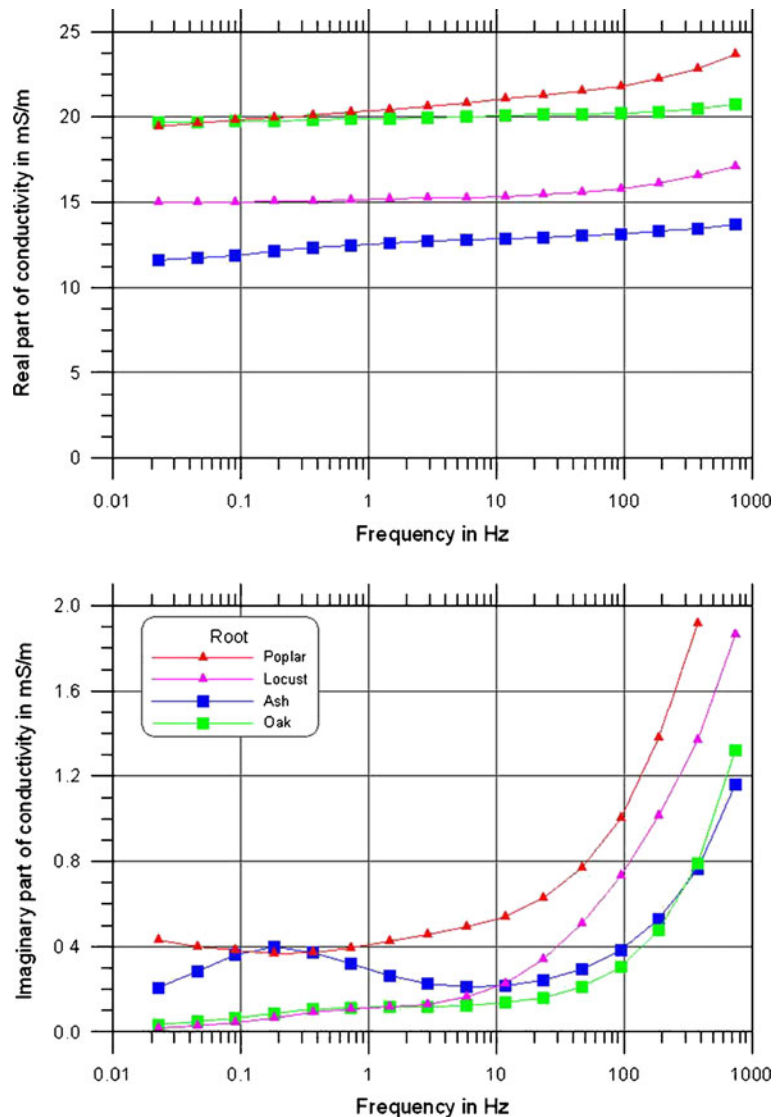
As with all other geophysical methods, detectability depends on contrast in the relevant physical property. The higher the contrast in electrical conductivity between the roots and the embedding material, the stronger the resulting signals in the electrical survey. Considering the conductivity of the soil and root samples in Tables 1 and 3, it becomes obvious that gravel and sand provide good conditions for root detection. Conversely, the electrical conductivity of silt material is close to that of the root samples. Consequently, the roots will hardly change the integral conductivity and will remain undetected.

The experiment with buried roots samples has shown that the measured conductivity greatly depends on the orientation of the samples, tree species and embedding material. Buried root samples generally increase the amplitude of conductivity. The strongest effect was observed with root samples parallel to the electrode array. Other orientations lead to weaker effects. The differences observed for the tree species investigated are significant. Poplar roots give the most significant signal in all the materials. The detection of oak and locust roots may be more difficult and the

Table 4 Conductivity ratio between measurements with and without buried root samples for both the real part and the imaginary part of conductivity at 1.46 Hz

Species	Samples orientation	Gravel		Sand		Silt	
		real	imaginary	real	imaginary	real	imaginary
Ash	transversal	0.935	1.494	0.934	1.337	0.904	1.322
	3×transversal	1.144	1.680	–	–	–	–
	longitudinal	1.406	2.125	1.144	1.718	0.785	1.111
	3×longitudinal	1.533	2.942	–	–	–	–
	vertical	–	–	–	–	1.097	1.179
Locust	transversal	1.079	1.422	1.343	1.697	1.183	1.355
	longitudinal	1.352	1.729	1.505	2.099	1.005	1.211
Oak	transversal	1.022	2.000	1.068	1.370	1.046	1.577
	3×transversal	1.237	2.974	–	–	0.958	1.286
	longitudinal	1.503	3.701	1.224	1.683	1.064	1.106
	3×longitudinal	1.528	4.066	–	–	–	–
	vertical	–	–	–	–	1.283	1.115
Poplar	transversal	1.353	7.448	1.164	3.151	1.318	3.367
	longitudinal	1.795	9.807	1.699	4.861	1.337	5.307

Fig. 7 Complex conductivity spectra of four root samples in a frequency range from 22.4 mHz to 750 Hz



identification of ash roots was impossible under these experimental conditions. The conductivity increase caused by the root samples may be explained by a current channelling in the wooden root material. Since the number of root samples for each species was limited, it is not possible to generalise the results. Root size and status at the time of sampling (water content, sap flow) have to be considered.

Besides the real part of conductivity, which can be approximated by the conductivity amplitude, the imaginary part of conductivity was assumed to provide better potential for root detection. Regarding the lowest value measured on the root samples (0.115 mS/m, Table 3) and highest value measured

on the soil samples (0.0285 mS/m, Table 1) a minimum ratio of 4 can be expected. This contrast proved to be sufficient to cause a reliably increased signal for most measurements of the imaginary part of conductivity. The conductivity ratios compiled in Table 4 show considerable variability as a function of tree species and sample orientation, leading to conclusions similar to those in the case of conductivity amplitude. Longitudinal orientation and poplar roots yield the strongest indication. The differences between species could be explained by the macroscopic character of the wood. In semi-ring porous woods (oak and locust), the pores are more numerous in young wood. The more regular distribution of the pore size in diffuse

porous woods (poplar and ash) leads to a stronger polarisation effect (Fig. 8).

The measured conductivity was also affected by differences in compaction and water content and not only by the type, size and orientation of root samples. Most spectra of the imaginary part of conductivity showed a steep increase towards higher frequencies. Considering that frequencies higher than 100 Hz are not suitable for field experiments, because measurements are distorted by electromagnetic coupling effects, lower frequencies should be chosen. Our experiment has shown that a frequency between 1 Hz and 10 Hz is a good choice. On the one hand, a SIP survey will be more time-consuming if lower frequencies are included. On the other hand, electromagnetic coupling effects are still negligible. A closer look at the complex conductivity spectra of root and soil samples that should be investigated in the lab will show whether a sufficient contrast in the electrical properties between root and soil material is observed in the selected frequency interval.

There are two types of dikes: flood protection river dikes and canal dikes. River dikes were mostly built using materials extracted from the river channel. The fine-grained sediments extracted from flood plains (fine sand, silt and clay) ensure a low permeability of the dike body. The narrow but impervious river dikes have to withstand intermittent flooding events. Most

canal dikes have been built during the last 50 years. They are very large and are constructed with coarse materials (sand and gravel) in the core and at the land side of the dike structure to drain the permanent water charge. Dike environments are far more complex. The geometry and structure of the dike to be investigated has to be considered. Seasonal variations of temperature and water content severely affect the conductivity of both dike material and roots. We may conclude from our experiment that a conventional geoelectrical survey that measures only conductivity amplitude will probably fail to detect roots if the dike body consists mainly of silt or clay material.

Our study must be considered only as a first step in the development of a non-destructive method for root detection in dikes. The experiments were performed under favourable conditions in the laboratory with root samples embedded in homogeneous material. Inhomogeneity of the dike material, lateral and vertical changes in water content and compaction pose a challenge for the geoelectrical survey at real dikes. Size and depth of the root fragments are major factors that influence the detectability. Larger roots close to the surfaces can be more easily identified than small fragments at a greater depth. Only extensive tests at different dikes will provide the experience to draw reliable conclusions on the detectability of roots.

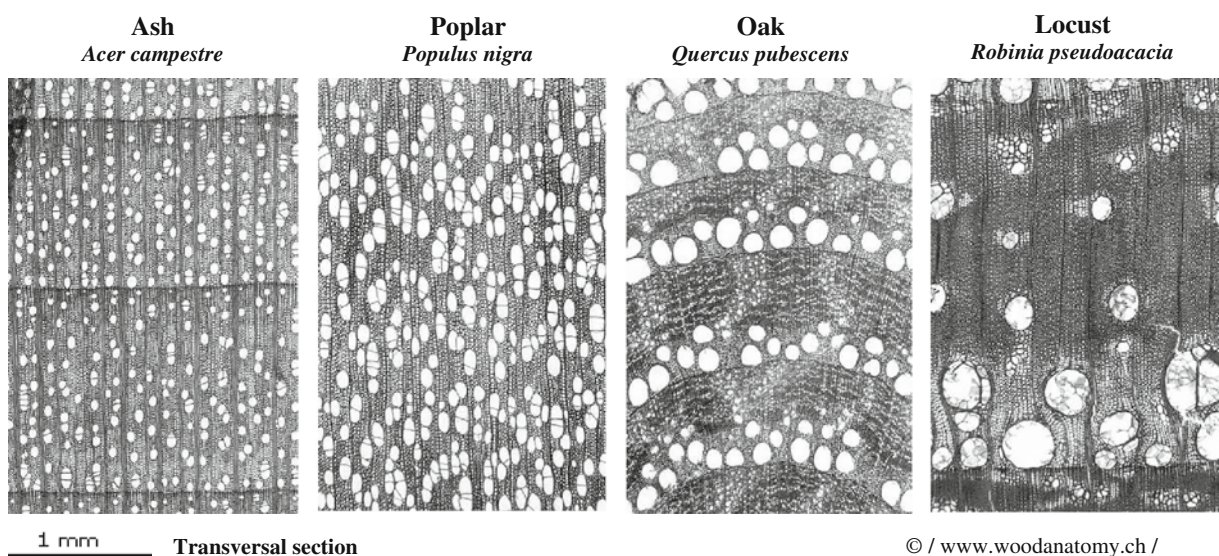


Fig. 8 Macroscopic wood anatomy for the four species studied. Diffuse distribution of pores for ash and poplar, and ring pores for oak and locust (Schweingruber 1982)

Conclusion

Regarding the results of our experiments, there is a good chance that a field procedure including the measurement of the imaginary part of conductivity would provide useful signals for the detection of extended root networks in dikes. The spectral induced polarisation method (SIP) provides complex conductivity data. In comparison with a conventional geoelectrical survey, SIP is a slow and expensive method that has not been included in routine dike inspections up to now (Palma-Lopes et al. 2008). Demonstrating the possibility of detecting the depth and extent of root networks in inhomogeneous dikes requires thorough investigation: calibration tests should be conducted on dikes with known root structures and under different conditions and in different seasons. Periods of active sap flows should be favourable. Such investigations could also be performed in other contexts where root structures and soil conditions are well known.

Acknowledgments We thank Pham Quy Ngoc and Nguyen Trong Vu (Ph.D. students at Clausthal University of Technology) for their help during the laboratory experiments and LERMI (Cemagref Aix en Provence) for providing the space to perform them. This study was funded by the Provence-Alpes-Côte d'Azur Region, Cemagref and the Procope Project (French Ministry of Foreign Affairs—French German collaboration). The constructive comments received from two anonymous reviewers significantly improved this manuscript.

References

- Abernethy B, Rutherford ID (2001) The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. *Hydrol Process* 15:36–79
- Al-Hagrey S (2006) Electrical resistivity imaging of tree trunks. *Near Surf Geophys* 4:179–187
- Al-Hagrey S (2007) Geophysical imaging of root-zone, trunk and moisture heterogeneity. *Jour Experiment Bot* 58:839–854. doi:10.1093/jxb/erl237
- Amato M, Basso B, Celano G, Bitella G, Morelli G, Rossi R (2008) In situ detection of tree root distribution and biomass by multi-electrode resistivity imaging. *Tree Phys* 28(10):1441–1448. doi:10.1093/treephys/28.10.1441
- Amato M, Bitella G, Rossi R, Gómez JA, Lovelli S, Gomes JJF (2009) Multi-electrode 3D resistivity imaging of alfalfa root zone. *Europ J Agronomy* 31:213–222. doi:10.1016/j.eja.2009.08.005
- Barsoum N (2001) Relative contributions of sexual and asexual regeneration strategies in *Populus nigra* and *Salix alba* during the first years of establishment on a braided gravel bed river. *Evol Ecol* 15:255–279. doi:10.1023/A:1016028730129
- Bischetti G, Chiaradia E, Simonato T, Speziali B, Vitali B, Vullo P, Zocco A (2005) Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy—Northern Italy. *Plant Soil* 278:11–22. doi:10.1007/s11104-005-0605-4
- Börner FD, Schopper J, Weller A (1996) Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements. *Geophys Prospect* 44:583–601
- 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 Phys* 21:1269–1278. doi:10.1093/treephys/21.17.1269
- 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 Soil* 219:103–116
- Danjon F, Barker DH, Drexhage M, Stokes A (2008) Using three-dimensional plant root architecture in models of shallow-slope stability. *Annals Bot* 101:1281–1293. doi:10.1093/aob/mcm199
- 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 Soil* 303:1–34. doi:10.1007/s11104-007-9470-7
- Doussan C, Pages L, Vercambre G (1998) Modelling of the hydraulic architecture of root systems: An integrated approach to water absorption—Distribution of axial and radial conductances in maize. *Annals Bot* 81:213–223
- Dupraz C, Simorte V, Dauzat M, Bertonni G, Bernadac A, Masson P (1999) Growth and nitrogen status of young walnuts as affected by intercropped legumes in a Mediterranean climate. *Agrofor Syst* 43:71–80. doi:10.1023/A:1026499103899
- Fitter A (2005) Characteristics and functions of root systems. In: Waisel Y, Eshel A (eds) *Plant Roots—The hidden half*. Marcel Dekker, New York, pp 193–237
- Gärtner H, Denier C (2006) Application of a 3D laser scanning device to acquire the structure of whole root systems—A pilot study. *TRACE—Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology* 4:288–294
- Heeraman DA, Hopmans J, Clausnitzer V (1997) Three dimensional imaging of plant roots in situ with X-ray computed tomography. *Plant Soil* 189:167–179. doi:10.1023/B:PLSO.0000009694.64377.6f
- Hruska J, Cermak J, Sustek S (1999) Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. *Tree Phys* 19:125–130. doi:10.1093/treephys/19.2.125
- Karrenberg S, Blaser S, Kollmann J, Speck T, Edwards PJ (2003) Root anchorage of saplings and cuttings of woody pioneer species in a Riparian Environment. *Funct Ecol* 17:170–177
- Khuder H, Danjon F, Stokes A and Fourcaud T (2007) Interactions between static and dynamic loading and their influence on acclimative growth in young trees. *In* International Conference on Wind and Trees, Vancouver, British Columbia, Canada.
- Lite SJ, Stromberg JC (2005) Surface water and ground-water thresholds for maintaining *Populus*–*Salix* forests, San

- Pedro River, Arizona. *Biol Conserv* 125:153–167. doi:10.1016/j.biocon.2005.01.020
- Martin T (2009a) Anwendung des komplexen elektrischen Widerstandsverfahrens an Eichen (*Quercus* spp.). In BAM Dissertationsreihe, Berlin.
- Martin T (2009b) Complex resistivity (CR) of wood and standing trees. In *Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Nantes, France June 30th–July 3rd. Ed NDTCE'09. pp 963–968.
- Mériaux P and Royet P (2007) Surveillance, maintenance and diagnosis of flood protection dikes—A practical handbook for owners and operators. Quae 162.
- Mériaux P, Vennetier M, Aigouy S, Hoonakker M and Zylberblat M (2006) Diagnosis and management of plant growth on embankment dams and dykes. In *Commission Internationale des Grands Barrages*, Barcelona. pp 1–20.
- Nadezhkina N, Cermak J (2003) Instrumental methods for studies of structure and function of root systems of large trees. *J Exp Bot* 54:1511–1521. doi:10.1093/jxb/erg154
- Nicolotti G, Socco LV, Martinis R, Godio A, Sambuelli S (2003) Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. *Jour Arboricul* 29:66–78
- Olhoeft GR (1985) Low-frequency electrical properties. *Geophysics* 50:2492–2503
- Pagès L (1996) Modeling Root system architecture. In: Waisel Y, Eshel A (eds) *Plant roots: The hidden half*. Dekker, New York, p 359
- Pagès L, Doussan C, Vercambre G (2000) An introduction on below-ground environment and resource acquisition, with special reference on trees. *Ann For Sci* 57:513–520. doi:10.1051/forest:2000138
- Palma-Lopes S, Djedai M, Nicaise J, François D, Mériaux P and Royet P (2008) Suivi d'infiltration dans une digue en terre par imagerie de résistivité électrique: expérimentation sur le canal des Houillères de la Sarre. In *Dixièmes Journées AGAP- Qualité*, Aix en Provence 21–22 octobre 2008. Ed GEOFCAN. pp 29–32.
- Petersen T, Al-Hagrey S (2009) Mapping root zones of small plants using surface and borehole resistivity tomography. *Lead Edge* 28:1220–1224. doi:10.1190/1.3249778
- Schleifer N, Weller A, Schneider S, Junge A (2002) Investigation of Bronze Age plankway by spectral induced polarisation. *Archaeol Prospect* 9:243–253. doi:10.1002/arp.194
- Schlumberger C (1920) Etude sur la prospection électrique du sous-sol: Gauthier-Villar et Cie, Chap. VIII, 70–72.
- Schweingruber FH (1982) Anatomie microscopique du bois. Institut Fédéral de Recherche Forestière, Zurich, p 220
- Standard NF P 94-056 : Analyse granulométrique des sols—Méthode par tamisage à sec après lavage, Norme Européenne NF EN ISO, Mars 1996
- Standard NF P 94-057 : Analyse granulométrique des sols—Méthode par sédimentation, Norme Européenne NF EN ISO, Mai 1992.
- Standard NF P 94-050 : Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux—Méthode par étuvage, Norme Européenne NF EN ISO, Septembre 1995
- Stokes A (2002) Biomechanics of tree root anchorage. In *Plant roots: the hidden half*, Eds Y Waisel and A Eshel. pp 175–186.
- Stokes A, Ball J, Fitter A, Brain P, Coutts M (1996) An experimental investigation of the resistance of model root systems to uprooting. *Annals Bot* 78:415–421
- Stokes A, Fourcaud T, Hruska J, Cermak J, Nadyezhdina N, Nadyezhdin V, Praus L (1999) An evaluation of different methods to investigate root systems architecture of urban trees in situ: I ground penetrating radar. *J Arboric* 28:2–10
- Vennetier M, Ripert C, Chandioix O, Mériaux P and Doirat G (2005) Gestion de la végétation des digues et berges sous contrainte de sécurité. *Ing EAT* 3–14.
- Weihls U, Dubbel V, Krummheuer F, Just A (1999) The electrical resistivity tomography—a promising technique for detection of coloured heartwood on standing beech trees (in German). *Forst und Holz* 54:166–170
- Weller A, Frangos W, Seichter M (2000) Three-dimensional inversion of induced polarization data from simulated waste. *J Appl Geophys* 44:67–83
- Weller A, Nordsiek S, Bauerochse A (2006) Spectral induced polarisation—a geophysical method for archaeological prospection in peatlands. *J Wetl Archaeol* 6:105–125
- Weller A, Slater L, Nordsiek S and Ntarlagiannis D (2010) On the estimation of specific surface per unit pore volume from induced polarization: A robust empirical relation fits multiple datasets. *Geophysics* 75, no. 4 (in press).
- Wielopolski L, Hendrey G, Daniels J and Mc Guigan M (1999) Imaging tree root systems in situ (GPR). In *Brookhaven National Laboratory*. pp 1–5. Upton NY USA.
- Zanetti C, Vennetier M, Mériaux P, Royet P, Dufour S, Provansal M (2008) L'enracinement des arbres dans les digues en remblai: étude des systèmes racinaires et impacts sur la sécurité des ouvrages. *Ing EAT* 53:49–67
- Zenone T, Morelli G, Teobaldelli M, Fischanger F, Matteucci M, Sordini M, Armani A, Ferrè C, Chiti T, Seufert G (2008) Preliminary use of ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography to study tree roots in pine forests and poplar plantations. *Funct Plant Biol* 35:1047–1058

5.4 Conclusions de l'article et perspectives

L'objectif de cette étude était de tester l'utilisation de méthodes de mesure géo-électriques pour détecter et différencier des échantillons de racines extraits de souches d'arbres implantés dans les digues.

L'expérience a démontré que la conductivité dépend beaucoup de l'espèce végétale, de l'orientation des échantillons de racine et des matériaux.

Dans la plupart des cas, les échantillons de racines enterrés augmentent la conductivité globale des matériaux. Les sables et les graviers fournissent les meilleures conditions pour la détection des racines. Au contraire, la conductibilité électrique du limon est très proche de celle des échantillons de racines. Par conséquent, les racines changent à peine la conductivité globale du matériau limoneux et y restent indétectables.

La configuration où l'échantillon de racine est parallèle à la rangée d'électrodes a abouti à l'augmentation la plus significative de la conductivité réelle. Une canalisation du flux de courant à l'intérieur de la racine pourrait expliquer ce phénomène. Les deux autres orientations (perpendiculaire et verticale) génèrent des effets plus faibles.

Les différences observées en fonction des espèces sont significatives. Les racines de peuplier donnent le signal le plus important dans tous les matériaux en augmentant fortement la conductivité globale. La détection des racines de chêne et de robinier est plus difficile, tandis que l'identification des racines de frêne était impossible dans ces conditions expérimentales.

On doit considérer notre étude comme une première étape dans le développement d'une méthode non destructive pour la détection des racines dans les ouvrages hydrauliques en remblai. Nos expériences ont été exécutées en laboratoire, dans des conditions favorables, avec des échantillons de racines enfouies dans des matériaux homogènes.

Les digues et les barrages présentent des environnements beaucoup plus complexes. On doit considérer la géométrie et la structure de l'ouvrage ainsi que la variabilité des matériaux constitutifs. Les variations saisonnières de température et de teneur en eau affecteraient probablement sévèrement la conductivité des matériaux et des racines.

Les résultats obtenus nous permettent d'avancer que la détection des racines dans les ouvrages en argile ou en limon sera probablement impossible ou à tout le moins difficile par des mesures de conductivité électrique conventionnelles. Elles pourraient toutefois être favorisées en choisissant des périodes où les racines ont une conductivité maximale, lors de la montée de sève par exemple.

Au regard des résultats de nos expériences en laboratoire, il y a de bonnes chances pour qu'une procédure de terrain incluant la mesure de la partie imaginaire de la conductivité fournisse des signaux utiles pour la détection des racines pénétrant les ouvrages. La méthode de polarisation spectrale induite (PSI) fournit des données de conductivité complexe. En comparaison avec les méthodes géo-électriques conventionnelles, la PSI est une méthode lente et coûteuse qui n'a pas été utilisée dans l'investigation des ouvrages jusqu'ici. La possibilité de détecter la profondeur et la position des racines principales dans des ouvrages en remblai hétérogène exigera un calibrage minutieux de la méthode : les tests de calibration devraient être conduits en conditions contrôlées (présence avérée de racines préalablement repérées en comparaison de zones dont les racines ont été éliminées par exemple) sur des digues ou des barrages présentant des matériaux et conditions différentes et durant des saisons variées. Les périodes de flux de sève actifs devraient être plus favorables.

Les résultats énoncés au sein des cinq chapitres précédents nous ont permis de dégager des directives concernant les modalités de gestion de la végétation ligneuse implantée sur les ouvrages hydrauliques en remblai.

Nous allons, dans la dernière partie de ce manuscrit, présenter une synthèse des risques que génèrent les systèmes racinaires ligneux pour les digues et les barrages en terre et énoncer les préconisations générales de gestion de la végétation arborée se développant sur ces ouvrages.

SYNTHESE SUR LES RISQUES INDUITS POUR LES OUVRAGES

VERS UN GUIDE DE RECOMMANDATIONS POUR LA GESTION DE LA VEGETATION

SOMMAIRE

Préambule.....	155
1. Risques induits pour les ouvrages hydrauliques liés à la présence d'arbres et de racines ligneuses	156
1.1. Typologie des risques.....	156
1.1.1. Les risques d'érosion interne.....	156
1.1.2. Les risques d'érosion externe	159
1.2. Les paramètres influençant le risque	160
1.2.1. Structure et architecture racinaires	160
1.2.2. Décomposition racinaire	161
1.2.3. Dimension de l'ouvrage.....	161
1.2.4. Nature des matériaux constitutifs du remblai	162
2. Premier recueil de recommandations de gestion ou de traitement de la végétation sur les ouvrages : vers un guide technique	162
2.1. Préconisations générales.....	162
2.2. Préconisations en fonction du type d'ouvrage hydraulique.....	163
2.2.1. Cas des digues à charge temporaire.....	163
2.2.2. Cas des digues à charge permanente.....	164
2.2.3. Synthèse des études de cas de la thèse.....	165
2.3. Préconisations de gestion applicables à court, moyen et long termes.	166
2.3.1. Entretien régulier réalisable à court terme. Interventions d'urgence	167
2.3.2. Reprise de l'entretien et travaux à moyen terme	167
2.3.3. Confortement de l'ouvrage à long terme	168
3. Conclusion et perspectives.....	169

Statut de l'article VI

Projet - à compléter et à soumettre en 2011 pour publication éventuelle dans la revue *European Journal of Environmental and Civil Engineering*

PREAMBULE

Cette quatrième partie propose d'abord une synthèse des risques induits, pour les ouvrages hydrauliques en remblai (digues et barrages), par le développement d'arbres et de leurs systèmes racinaires sur, dans ou à proximité de la structure génie civil.

Puis, dans le souci de valoriser les conclusions des six rapports de diagnostic de la végétation que nous avons été amenés à élaborer à propos des aménagements hydrauliques objets des expérimentations de cette thèse, nous dressons un recueil - certes encore incomplet - des préconisations de gestion ou de travaux pouvant permettre de remédier aux dégradations ou aux risques engendrés par une végétation arborescente non - ou insuffisamment - maîtrisée sur les ouvrages. Cette première esquisse de recueil de recommandations préfigure la rédaction d'un guide technique abouti, et visant à l'exhaustivité, que nous n'avons pas eu le temps matériel de réaliser dans le cadre des trois années de ce travail.

1. Risques induits pour les ouvrages hydrauliques liés à la présence d'arbres et de racines ligneuses

1.1. Typologie des risques

Comme sur les terrains en pente, le rôle des arbres est ambivalent vis-à-vis de la sécurité des ouvrages hydrauliques. Les effets positifs, d'interception des pluies directes par les houppiers, de protection contre l'érosion de surface et de renforcement du sol face aux glissements superficiels, s'opposent aux effets négatifs liés aux déracinements, sous l'effet du vent ou des courants, des arbres de haute tige ou au port déséquilibré, à la déstructuration et au décompactage du sol lors du développement et de la décomposition des souches et des racines.

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).

1.1.1. Les risques d'érosion interne

Figurant parmi les principales causes de rupture des ouvrages hydrauliques en terre, le mécanisme d'érosion interne est favorisé par la présence des systèmes racinaires qui constituent des zones d'hétérogénéité et de perméabilité dans le corps du remblai ou au contact remblai-fondation.

De leur vivant, les racines ont une action mécanique défavorable. Elles induisent (i) le décompactage des matériaux de remblai, (ii) la déstructuration des revêtements maçonnés ou bitumés (Figure IV.1), (iii) la colonisation des joints puis leur dégradation (Figure IV.2) et (iv) l'élargissement des fissures (Figure IV.3) ainsi que (v) l'envahissement et le colmatage des systèmes de drainage ou des filtres.

Après pourrissement, elles génèrent un risque d'effondrement lorsqu'il s'agit de souches ou de racines de fort diamètre (Figure IV.4) et de renard hydraulique du fait de la création de conduits francs ou à perméabilité élevée favorisant les infiltrations et la circulation de l'eau (Figure IV. 5), ce qui amène dans certain cas à la formation de brèches inopinées dans la digue ou le barrage (Figure IV.6).



Figure IV.1 : Colonisation par des racines d'arbre d'un joint ouvert de perré maçonné - amorces de déstructuration (Levée de la Loire)



Figure IV.2 : Colonisation par les racines d'un joint de perré bétonné (Digue de canal du Rhône)



Figure IV.3 : Dégradation du perré par colonisation d'une fissure par les racines (digue de canal du Rhône)



Figure IV.4 : Effondrement en crête de digue lié à la décomposition d'une souche (Digue de l'Isère)



Figure IV. 5 : Renard hydraulique



Figure IV.6 : Formation d'une brèche (Digue de Camargue)

1.1.2. Les risques d'érosion externe

L'arrachement d'un arbre (Figure IV.7), par le vent (chablis) ou le courant, sur une digue ou un barrage, réduit ponctuellement la largeur du remblai si l'arbre se situait sur l'un des talus et/ou engendre un point bas si l'arbre occupait la crête et si cette dernière est étroite. Il peut en résulter alors (i) un glissement du talus de l'ouvrage du fait de la rupture de pente (instabilité mécanique), (ii) un affouillement du pied ou une érosion externe du talus côté rivière ou canal de l'ouvrage par des courants tourbillonnaires (Figure IV.8), (iii) un raccourcissement du chemin hydraulique dans le remblai (ce qui renvoie à un risque d'érosion interne), voire (iv) une surverse (au niveau du point bas sur la crête créé par un chablis).



Figure IV.7 : Renversement d'un robinier sur le talus côté rivière (Digue de l'Isère)



Figure IV.8 : Affouillement du pied de digue par des courants tourbillonnaires (Digue de l'Isère)

Les risques sont d'autant plus importants que les dimensions de arbres ou des souches sont grandes relativement à la hauteur ou au rapport largeur d'emprise / hauteur¹ de la digue ou du barrage : le risque est, par exemple, particulièrement fort pour des digues ou des barrages de hauteur inférieure à 5 m, à largeur de crête inférieure à 1 m et à fruits* de talus inférieurs ou égaux à 1,5 (ex : digues du delta de Camargue avant confortement et cas de nombreux barrages d'étang sur l'ensemble du territoire).

Les mécanismes d'érosion décrits ci-dessus sont enclins, en outre, à s'entraîner l'un l'autre ou à s'auto-entretenir. Par exemple, un trou laissé par un arrachement d'arbre sur un talus de digue côté rivière va avoir tendance à s'agrandir lors de la crue courante ou de la crue suivante par l'effet des courants tourbillonnaires, ce qui induit le raidissement du talus et peut conduire à son glissement d'ensemble à la décrue et, par suite, au raccourcissement des lignes de fuite sur le profil concerné (d'où une aggravation locale du risque d'érosion interne lors des prochaines crues). Enfin, un glissement de talus créé sur le parement touché une nouvelle zone sujette à érosion et peut même contribuer à y concentrer des courants néfastes pendant la crue.

1.2. Les paramètres influençant le risque

Le développement racinaire dans les ouvrages hydrauliques peut être plus ou moins gênant, vis-à-vis de la sécurité. Le risque dépend de la structure des systèmes, de la morphologie et de la direction des racines, du degré de décomposition des racines mortes, de la dimension de l'ouvrage et de la nature des matériaux constitutifs du remblai.

1.2.1. Structure et architecture racinaires

Le risque dépend de la structure des enracinements qui diffère entre les systèmes traçants, fasciculés, mixtes et pivotants et de la morphologie des racines.

Nous avons vu que la structure des systèmes racinaires est fortement influencée par les matériaux ; les systèmes fasciculés se développent dans des matériaux fins, tandis que les trois autres types se rencontrent généralement sur matériaux grossiers.

¹ Ce rapport reflète l'étroitesse du profil en travers de l'ouvrage : plus il est petit, plus le profil est étroit.

Un système traçant est peu résistant au risque d'arrachement (chablis) mais assure en contrepartie une fixation de la partie superficielle du sol face au ruissellement ou au courant. Ce type de structure est dangereux pour l'ouvrage si les racines s'enfoncent dans le corps de digue à l'horizontale et traversent une partie de l'ouvrage.

Un système fasciculé présente une bonne résistance à l'arrachement du fait de la répartition dense et homogène des racines, mais a un volume d'encombrement élevé, nuisible pour la structure génie civil en cas de pourrissement ou d'arrachage.

Un système pivotant mature génère un risque pour les ouvrages car il pénètre le corps du remblai. Il assure un bon ancrage de l'arbre par son ou ses pivots mais pose cependant des problèmes de déstructuration des matériaux. Les pivots de gros diamètre engendrent en outre, un risque d'effondrement après leur pourrissement.

Un système racinaire à structure mixte, composé de racines horizontales et verticales, rassemble les avantages et inconvénients précédemment énoncés pour les systèmes traçants et pivotants.

Bien que la structure racinaire des souches dépende peu de l'espèce végétale, certaines essences ont des prédispositions en termes d'architecture racinaire, qui rendent leur présence indésirable sur certaines parties des digues. C'est le cas des robiniers et des peupliers qui développent souvent une à trois grosses racines traçantes, aux dimensions disproportionnées par rapport à celle de la souche. Ces racines sont orientées soit en direction de la rivière ou du canal (pénétrant le remblai), soit parallèlement à l'ouvrage (restant ainsi superficielles). Elles peuvent atteindre plus de 10 m de longueur et avoir des diamètres au départ de plus de 20 cm. A la différence du robinier qui ne possède que des petits pivots lorsqu'il est doté d'une structure mixte, le peuplier peut développer de puissantes et profondes racines verticales. Ces racines de grosses dimensions sont surtout observées dans les matériaux grossiers ou drainants.

1.2.2. Décomposition racinaire

Après la mort naturelle ou l'abattage des arbres, les systèmes racinaires se décomposent et laissent des zones d'hétérogénéités, voire des vides, dans les remblais. Ce sont les dimensions des racines décomposées, leur position dans le remblai et leur direction qui sont susceptibles de générer des problèmes de sécurité vis-à-vis des ouvrages hydrauliques en terre.

Les racines longues horizontales peuvent créer des galeries tandis que les souches et les pivots de gros diamètre engendrent un risque d'effondrement après leur pourrissement. Généralement, une variation de la décomposition du matériel végétal en fonction de l'éloignement de la souche et du diamètre a pu être décrite. Les racines de faible diamètre pourrissent et disparaissent plus rapidement que les racines de diamètre important. La conservation de l'écorce et la disparition du bois de cœur induit la formation de galerie interne à la racine. Il y a cependant une variabilité du phénomène liée aux attaques de champignons ou d'insectes.

1.2.3. Dimension de l'ouvrage

Comme pour l'érosion externe, le risque dépend évidemment des dimensions relatives de l'ouvrage hydraulique : il est plus élevé sur les barrages ou digues à profil en travers étroit où la souche occupe une part relative importante du remblai et constitue ainsi une zone significative d'hétérogénéité. En outre, sur les digues étroites et à matériau limoneux cohérent mais peu compact, les racines traçantes peuvent traverser l'ouvrage de part en part et créer des conduits francs après leur pourrissement.

Les digues de protection contre les crues ont généralement un profil plus étroit que les digues de canaux et sont souvent le support d'arbres âgés, dont les systèmes racinaires occupent,

localement, plus d'un tiers du volume de l'ouvrage, ce qui rend la situation dangereuse. A contrario, ces digues à charge temporaire ne voient pas nécessairement un régime d'écoulement permanent s'établir en leur sein si les crues qu'elles subissent sont de courte durée : ce qui, sur le papier et toutes choses égales par ailleurs, peut les rendre moins exposées à l'érosion interne que les digues à charge permanente. Toutefois, compte tenu de la grande hétérogénéité et fragilité de constitution des digues de protection contre les crues, cet élément a priori favorable ne prévaut que très rarement.

1.2.4. Nature des matériaux constitutifs du remblai

Tandis que les matériaux grossiers favorisent le drainage des remblais et le rabattement de la ligne piézométrique, les matériaux fins retiennent l'humidité et favorisent les remontées capillaires.

Pour une structure racinaire identique, le risque de chablis (arrachage de l'arbre) est plus élevé dans les matériaux sableux, tandis que les arbres enracinés dans des matériaux limoneux sont plus stables.

Les racines, notamment celles en décomposition, sembleraient avoir un effet moindre sur la structure des matériaux constitutifs de l'ouvrage lorsque le remblai est sablo-graveleux. En effet, le colmatage progressif des empreintes de racines pourries par les particules fines de sable et le réarrangement spontané des matériaux peu cohésifs évitent la formation de galeries franches. De plus, les propriétés drainantes caractérisant ce type de matériaux ne sont pas fortement modifiées du fait des racines décomposées, par rapport à une situation sans racine : le risque de renard hydraulique est peu augmenté. Néanmoins, on peut penser que le réarrangement des grains conduit à un décompactage du sol qui pourrait à son tour favoriser la suffusion.

Par contre, dans les matériaux fins et cohésifs, les empreintes des racines ont tendance à demeurer après la décomposition et peuvent créer de véritables conduits dans le corps de digue.

Ces différents paramètres influençant les risques d'érosion interne et externe des ouvrages hydrauliques sont à prendre en compte dans l'élaboration des préconisations de gestion de la végétation ligneuse.

2. Premier recueil de recommandations de gestion ou de traitement de la végétation sur les ouvrages : vers un guide technique

Le principal objectif des recommandations concernant la gestion de la végétation ligneuse implantée sur les ouvrages hydrauliques et à leur proximité sont de limiter les risques de déstructuration de l'ouvrage liés aux phénomènes de développement et de dépérissement racinaires ainsi que de réduire le risque de chablis tout en maintenant un état boisé, là où elle ne menace pas la sécurité.

D'autres recommandations ont trait aux interventions à prévoir plus ou moins en urgence lorsque des désordres imputables aux arbres sont relevés sur les ouvrages hydrauliques.

2.1. Préconisations générales

Un diagnostic génie civil approfondi, comprenant une caractérisation de la végétation (essences, âges, dimensions, état sanitaire, répartition, ...) sur l'ouvrage, est nécessaire pour déterminer les travaux d'intervention sur la végétation en place ainsi que les travaux de Génie

Civil d'accompagnement, selon une priorisation fixée à partir des niveaux d'aléas issus des éléments du diagnostic.

Les préconisations générales de gestion ou d'intervention sont les suivantes :

- idéalement, ne pas laisser se développer d'essences ligneuses sur les digues et à leur proximité – notamment près de ou sur les ouvrages de drainage (risque de colmatage) ou les ouvrages maçonnés de protection (risque de déstructuration) ;
- lorsqu'une végétation ligneuse est déjà présente, empêcher le développement d'arbres de dimension trop importante (limiter la prise au vent) par élagage ou recépage. Sachant que le recépage des arbres n'empêche pas le développement de leur partie racinaire, il faut éviter le vieillissement des souches (augmentation du volume des souches et du diamètre des racines). Dans l'absolu, on devrait fixer une taille maximale des souches comme on fixe une taille maximale des parties aériennes, et donc les dévitaliser ou les arracher après un ou quelques recépages. Le nombre de recépages autorisés dépendra de leur fréquence, des caractéristiques de l'ouvrage (taille, matériaux, pente des talus, structure interne) et de la vitesse de croissance des arbres. Comme cette vitesse est fonction de l'espèce, des matériaux, du climat local et de la position sur l'ouvrage ou par rapport à celui-ci, les consignes peuvent différer en fonction de cette position ;
- l'abattage des arbres dangereux (de grandes dimensions, penchés ou malades) doit être suivi de l'extraction des souches (travaux qui doivent s'accompagner de reprises locales du talus : cf. IV.2.3.2 ci-après).

Certaines contraintes extérieures donneront aux consignes de gestion une orientation particulière :

- l'accueil du public qui nécessite de prendre en compte des considérations paysagères et récréatives du moins dans les secteurs urbains. En effet, en milieu urbain, les bords de rivière ou de canal constituent souvent, les dernières zones de refuge des arbres auxquelles les riverains sont attachés.
- l'intérêt écologique - biologique, faunistique et floristique - qu'il est essentiel de préserver (Piégay et al. 2003). Les corridors rivulaires servent de lieu de vie à de nombreux animaux terrestres et à des oiseaux. Ils apportent un ombrage au bord de l'eau que les poissons apprécient et qui tempère le réchauffement des eaux. Les structures racinaires en berge contribuent à créer des caches pour les poissons.

2.2. Préconisations en fonction du type d'ouvrage hydraulique

2.2.1. Cas des digues à charge temporaire

Dans le cas des digues de protection contre les crues, l'état de résistance de l'ouvrage en charge s'observe uniquement pendant les périodes de crues et la défaillance de l'ouvrage est généralement très rapide et difficilement contrôlable. En effet, il est rare de pouvoir suivre l'évolution de la ligne piézométrique car ces digues ne sont en général pas dotées de piézomètres. De même, il n'est pas possible de contrôler les débits de fuite ou la clarté de l'eau dans un contre-canal comme dans le cas des digues des canaux.

De plus, le linéaire très important des digues de protection contre les inondations (environ 9 000 km en France, 7 500 km en Angleterre, 14 000 aux Pays-Bas, rend complexe la surveillance rapprochée de ces ouvrages. Enfin, la multitude et la diversité de statut des propriétaires de ce type de digues, compliquent l'homogénéisation de la gestion de la

végétation (problèmes d'information et de coût) ainsi que l'entretien et le confortement de l'ouvrage (problème d'acquisition du foncier et/ou manque de moyens).

Aussi, la végétation devrait être gérée de façon plus sécuritaire sur les ouvrages à charge hydraulique temporaire que sur les digues à charge permanente du fait qu'en général, les premières ont un profil plus étroit que les secondes, que leur surveillance est moins aisée et qu'elles ne sont pas équipées de dispositif d'auscultation.

Cependant, les préconisations de gestion adaptées aux digues de canaux et barrages ne sont pas toujours aisément extrapolables aux digues de protection contre les crues. En effet, il faut prendre en compte la morpho-dynamique des fleuves et rivières, actuellement marqués par un processus d'incision important lié à un déficit sédimentaire, qui modifie le profil en long des cours d'eau et la position relative des digues – qui se retrouvent souvent perchées sur des berges verticales en érosion. L'abatage de la totalité des arbres avec extraction des souches et reconstitution du parement ou la création d'une paroi étanche dans la digue, qui présente l'inconvénient de déconnecter la rivière de sa nappe alluviale (abaissement du toit de la nappe d'accompagnement), ne sont pas envisageables à court terme écologiquement et économiquement sur l'ensemble du linéaire de digues boisées en France. Il faudrait cependant, à plus long terme, tendre vers cet objectif. Ces solutions lourdes doivent être mise en œuvre en priorité sur des zones fragiles ou à forts enjeux aval. C'est pourquoi, le recours au plan de gestion permettant de reprendre l'entretien de la végétation sur plusieurs années est souvent préconisé comme solution de moyen terme dans le cas des digues à charges temporaires et parfois aussi sur les ouvrages à charge permanente.

2.2.2. Cas des digues à charge permanente

Dans le cas des digues de canaux ou barrages, présentant des grandes dimensions et au profil en travers large (hauteur supérieure à 10 m, largeur de crête de l'ordre de 10 m) et fruits des talus supérieurs à 2,5), il est possible d'appliquer des consignes de gestion sectorisées. A partir de profils en travers types, six zones peuvent être différenciées en fonction du risque induit par la végétation arborescente (Figure IV. 9):

- Zone 1 : Parement amont
- Zone 2 : Crête
- Zone 3 : Haut de parement aval (tiers supérieur)
- Zone 4 : Milieu de parement aval
- Zone 5 : Bas de parement aval (tiers inférieur) et débouché du dispositif drainant
- Zone 6 : Pied de digue côté aval

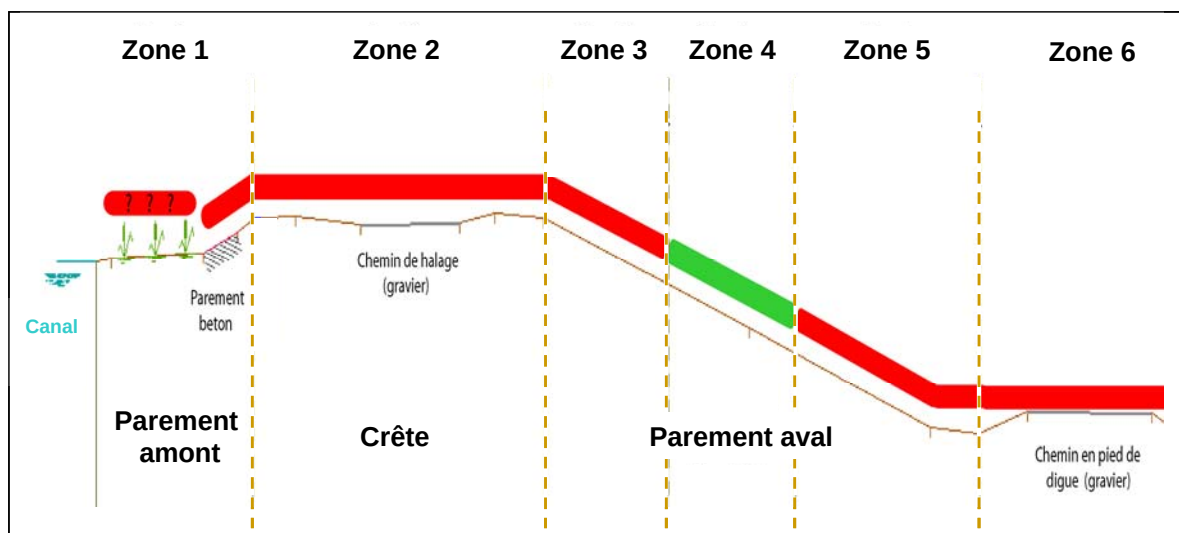


Figure IV. 9 : Coupe type et zonage d'une digue de canal (Zanetti et al., 2008)

Il est préconisé d'éliminer tous les arbres se situant en zones 1, 5 et 6 et tous les arbres de haute tige sur les zones 2 et 3.

La présence des arbres implantés dans la zone 4 est tolérée mais soumise à conditions.

Il s'agit de maintenir la présence d'un boisement sur la digue (fonctions écologique et sociale de la végétation ligneuse), tout en limitant la dimension des arbres. Ceci comprend la dévitalisation et suppression des grosses souches anciennes afin de réduire le risque de déstructuration du remblai après décomposition ainsi que le rabaissement de la hauteur des arbres (vis-à-vis des problèmes de stabilité). La gestion « en îlot » des arbres autorisés sur cette zone de la digue est préconisée. En effet la forme géométrique des îlots boisés permet une observation de l'ensemble du talus, par une seule personne, depuis la crête de digue (Figure IV.10), intéressante pour une bonne conduite de l'examen visuel du talus en cas de situation d'urgence et bien que, dans les zones d'accueil du public, les formes d'emprise de végétation trop géométriques ne soient pas très prisées.

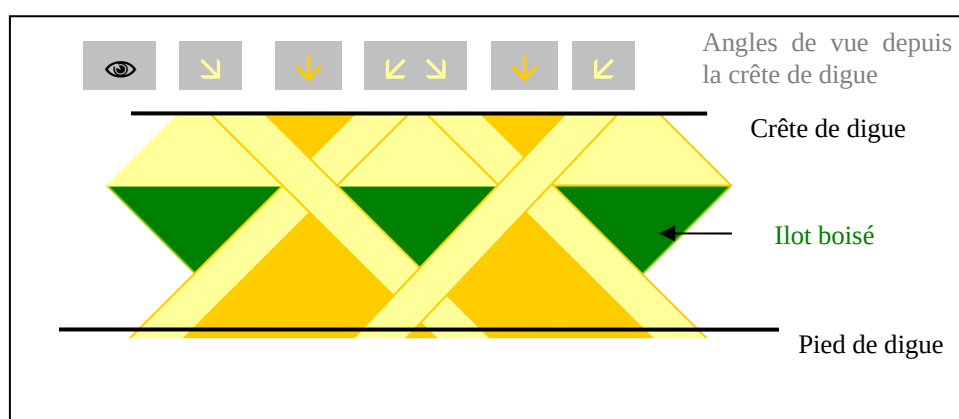


Figure IV.10 : Gestion en îlot des arbres en zone 4 (d'après une pratique CNR)

Les seuils de dimension, de diamètre et de hauteur des arbres, ainsi que la surface des îlots sont fixés selon la dimension de l'ouvrage.

Les consignes ci-dessus, relativement tolérantes vis-à-vis de la végétation ligneuse, sont inadaptées au cas des digues à profil en travers trop étroit que l'on rencontre notamment le long des anciennes voies navigables de notre pays.

2.2.3. Synthèse des études de cas de la thèse

Le tableau 1 présente une synthèse des préconisations de gestion énoncées pour les différents types d'ouvrages étudiés dans le cadre des chantiers exploratoires réalisés durant la thèse.

Site et gestionnaire	Type d'ouvrage et linéaire	Végétation sur l'ouvrage	Préconisations de gestion	Choix du gestionnaire
Donzère et Montélimar CNR	Digue de canal à charge permanente (30 km x 2)	Présence d'arbres présentant peu de risques pour l'ouvrage. Entretien suivant la "doctrine de gestion de la végétation" éditée en 1999 par la CNR	- Extraire les souches des arbres de plus de 40 cm de diamètre au collet ou ayant déjà été recépées 2 fois et de plus de 10 m de hauteur et purge des talus - Eliminer et dessoucher les arbres sur le tiers inférieur du talus à proximité du massif drainant - Eliminer et dessoucher en priorité les ligneux morts, malades ou endommagés ainsi que les peupliers et robiniers	Préconisations en accord avec la doctrine de gestion de la végétation appliquée par la CNR
Lyon (parement côté terre ou contre-canal) EDF	Digue de canal à charge permanente (16 km)	Présence de nombreuses vieilles souches en décomposition, beaucoup de robiniers et de grands peupliers	- Conservation de la roselière (car effet de colmatage et renforcement de l'étanchéité) avec fauchage écologique périodique - Dessouchage des arbres et remise en état du perré et des enrochements si dégradés	Extraction de la totalité des souches sur tout le parement avec reprise et purge du talus
Lyon (parement côté canal) EDF	Digue de canal à charge permanente (16 km)	Présence d'une roselière avec de jeunes arbres implantés au niveau des enrochements et du perré de protection contre le batillage	Impossible d'éliminer tous les arbres sans réfection complète des digues Mode de gestion jardinatoire en zone urbaine et en taillis en zone rurale (en rotation, tous les 5 à 10 ans) pour abaisser les densités	En accord avec les préconisations énoncées
Grenoble AD Isère	Digue de protection contre les crues à charge temporaire (215 km au total)	Digue fortement boisée sur certains secteurs. Application du plan de gestion élaboré par le Cemagref en 2003, en cours.	Extraction de la totalité des souches (une vingtaine d'arbres) et purge des talus	Application du plan de gestion établi en 2003, travaux de génie civil avec extraction des souches sur certaines portions
Castérino EDF	Digue de fermeture de barrage à charge temporaire (80 m)	Présence de gros mélèzes dont le système racinaire occupe plus d'1/3 de la digue.	- Dessouchage des platanes sur le parement amont - Dessouchage des plus gros arbres, purge des talus et recharge drainante sur le tiers inférieur - Campagne de sondages géotechniques pour connaître la constitution du remblai	Etudes complémentaires en cours pour définition des travaux
Monjoux CG Isère	Barrage à charge permanente (200 m)	- Parement amont : présence de gros platanes en crête du barrage - Parement aval : présence d'une forêt en taillis	- Extraction des souches en parement amont et réalisation d'une évacuateur de crue - Premiers travaux de dessouchage sur le parement aval prévus en hiver 2010-2011	
Sur les sites de Pertuis et de Cosne-sur-Loire : travaux de déboisement des digues déjà en cours lors des études de terrain avec éradication des arbres, dessouchage et confortement de l'ouvrage				

Tableau IV.1: Synthèse des préconisations de gestion énoncées pour chaque site d'étude

2.3. Préconisations de gestion applicables à court, moyen et long termes.

Selon l'ampleur et le stade de colonisation des arbres, les moyens de prévention des risques liés à la présence de végétation ligneuse sur les remblais d'ouvrages hydrauliques peuvent aller des simples dispositions d'entretien et de surveillance à de lourds travaux de génie civil. La mise en œuvre de ces moyens est justifiée par l'obligation réglementaire (décret du 11/12/2007 et ses arrêtés d'application) de maintenance d'un ouvrage hydraulique de génie civil.

2.3.1. Entretien régulier réalisable à court terme. Interventions d'urgence

L'objectif de l'entretien régulier de la végétation est de ne pas laisser se développer d'essences ligneuses sur les ouvrages et à leur proximité (sur une bande de 5 à 10 m de part et d'autre des pieds du talus).

Lorsque la végétation ligneuse est malencontreusement installée, il faut empêcher, par des tailles régulières (en cépées), le développement d'arbres de dimension trop importante.

Dans ce cas, les interventions d'application immédiate sont :

- un débroussaillage régulier (au minimum une fois par an) entre les arbres existants ;
- si nécessaire et a minima, la création de sentiers permettant un cheminement et une observation aisés au moins en crête et en pied de parement ;
- des visites régulières de surveillance avec compte-rendu dans un registre de l'ouvrage : 1 fois par mois au minimum, et à l'occasion de chaque crue (examen en crue ou post-crue).

En cas de désordre grave imputable à la végétation sur un barrage ou une digue en charge (par exemple, une fuite apparaissant subitement autour d'enchevêtrement de racines en parement aval), l'abaissement d'urgence de la cote de la retenue – voire la vidange totale du plan d'eau – est à préconiser. Une telle mesure est difficile, voire impossible, à mettre en œuvre pour certains canaux hydroélectriques connectés à la rivière et pour les digues de protection contre les crues : il convient donc, pour ses ouvrages, de s'orienter vers des solutions d'engraissement aval drainant et contre-filtre construit en urgence au débouché de la fuite (après abattage si possible, mais sans dessouchage afin de ne pas aggraver l'évolution de l'érosion interne) ou, à défaut, la prise de mesures d'évacuation préventive des zones menacées en cas de rupture. Ces travaux seront bien évidemment à reprendre après la crue ou lorsqu'une vidange de la retenue aura été possible.

2.3.2. Reprise de l'entretien et travaux à moyen terme

En cas d'arbres épars, il convient d'abattre les arbres de grandes dimensions, penchés ou malades et d'extraire les souches (travaux qui doivent s'accompagner de reprises partielles du talus de l'ouvrage). Eviter également le développement des peupliers et des robiniers dont les caractéristiques des systèmes racinaires rendent la présence préjudiciable sur les ouvrages : ces arbres feront donc partie de ceux à traiter en priorité.

En cas de forêt, il est nécessaire d'abattre et d'extraire la totalité de la végétation ligneuse implantée sur l'ouvrage (travaux qui doivent s'accompagner d'une reprise complète du talus et, si nécessaire et à plus ou moins brève échéance, d'un confortement du remblai par exemple par recharge aval).

Pour ce qui est des travaux de reconstitution locale de talus après dessouchage, le principe est d'agrandir et de taluter les parois de la fouille afin de pouvoir compacter le fond de fouille (si le matériau s'y prête), disposer si nécessaire un géotextile-filtre et permettre la mise en œuvre et le compactage par couches du matériau de remblaiement, de caractéristiques adaptées selon le talus concerné. La nature du matériau filtrant et les caractéristiques du géotextile sont à déterminer en fonction de la granulométrie des matériaux du talus dans chaque zone d'extraction. En travaux de finition, une couche de terre végétale peut être régalande en surface et ensemencée (graminées uniquement), à condition de replier préalablement le géotextile sur le sommet de l'ouvrage. Pour les ouvrages à charge permanente, ces travaux doivent être conduits à retenue abaissée si possible afin de diminuer, à titre préventif, le gradient hydraulique et une surveillance visuelle renforcée des zones ainsi traitées est à prévoir lors du rétablissement de la cote d'exploitation.

Si nécessaire, ces travaux seront précédés de la réalisation d'une étude de diagnostic approfondie s'appuyant, si non réalisée récemment, sur une campagne de reconnaissances géotechniques (sondages répartis sur des profils amont-aval et équipés en piézomètres, prélèvement d'échantillons et essais en laboratoire de mécanique des sols) afin de mieux connaître la structure et la composition de l'ouvrage pour évaluer le risque plus précisément et affiner la conception des travaux de moyen et long termes (ex : "Etude du renforcement de la digue du Rhône, rive droite, entre Beaucaire et Fourques", SYMADREM, Plan Rhône, Juin 2009).

2.3.3. Confortement de l'ouvrage à long terme

Deux principales familles de solutions sont envisageables :

- mise en place d'une recharge aval contre-filtre, sur la totalité ou une partie de la hauteur du parement aval (Figure IV.11), avec un dispositif de collecte et de jaugeage des débits de drainage ;
- création d'une paroi étanche (paroi moulée ou rideau de palplanches, coût de 150 à 200 € / m²) afin de s'affranchir des risques liés à la présence des racines (Figure IV.12). On évitera tout de même à terme la présence de très gros arbres vis-à-vis des risques de chablis et d'érosion externe.

La création d'une recharge est l'option a priori la moins coûteuse (sauf si elle nécessite une acquisition foncière), mais la plus impactante sur le plan paysager puisque requérant l'enlèvement de toute la végétation sur son emprise, y compris sur une bande de terrain en pied aval. Comme nous l'avons vu, ce type de solution peut également s'envisager en situation d'urgence, à condition de disposer d'un stock suffisant du matériau adéquat.

Dans les cas fréquents des petits barrages anciens possédant un évacuateur de crues sous-dimensionné par rapport aux standards actuels ou de digues de protection contre les crues sans déversoir de sécurité, une coupure étanche par paroi épaisse - certes coûteuse - peut avantageusement se voir confier une fonction secondaire d'amélioration de la résistance du remblai à la surverse et au déferlement des vagues vis-à-vis des crues exceptionnelles.



Figure IV.11 : Recharge aval drainante (Digue de Camargue)



Figure IV.12 : Réalisation d'une paroi moulée (Digue en Pologne)

3. Conclusion et perspectives

Il est nécessaire d'affiner et de compléter ce premier recueil de préconisations de gestion et d'intervention, notamment en intégrant le retour d'expérience d'autres études de cas et en prenant davantage en compte les propriétés de la structure génie civil (matériaux constitutifs, position et variation de la ligne piézométrique ou de la nappe, présence d'un noyau argileux compacté ou d'une paroi étanche).

Tel sera l'objet du guide de recommandations techniques dont nous allons assurer l'élaboration dans le prolongement immédiat des travaux de la présente thèse. L'objectif est la remise à l'éditeur de ce guide - très attendu par la profession - pour la fin de l'année 2011.

Parallèlement, les éléments énoncés précédemment seront approfondis et complétés, et seront intégrés dans un projet de publication scientifique dans la revue *European Journal of Environmental and Civil Engineering* : « Woody vegetation on earth dikes: risks assessment and management solutions ».

CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

CONCLUSIONS

Ce projet de recherche résulte de la forte demande des gestionnaires d'ouvrages hydrauliques en remblai (CNR, EDF, AD Isère...), en quête de conseils et de solutions pour la gestion de la végétation implantée sur leurs digues et barrages. Ce besoin fait suite aux nombreux accidents hydrauliques qui ont affecté le territoire français, notamment le quart Sud-Est de la France, durant les vingt-cinq dernières années.

Lors de plusieurs de ces événements, les propriétaires et gestionnaires d'ouvrages ont constaté que la présence d'essences ligneuses engendrait un vrai problème en matière de sécurité. D'une part, les arbres gênent la surveillance visuelle des ouvrages, favorisent la présence d'animaux fouisseurs qui creusent des terriers dans les remblais ; d'autre part, le développement puis le pourrissement de leur système racinaire, ou l'arrachage d'arbre de grande taille fragilisent les remblais.

Le retour d'expérience, issu des observations des gestionnaires sur le terrain, est ainsi un élément fondamental pour la formulation de questions scientifiques précises. Ces problématiques aboutissent à la mise en place de projets de recherches finalisées, qui, une fois menés à terme, permettent d'améliorer les pratiques de gestion.

L'ensemble des travaux et des réflexions développés dans cette thèse avait donc pour but d'améliorer nos connaissances sur l'enracinement des arbres dans les ouvrages hydrauliques en terre et de déterminer les aléas associés. Pour cela, nous avons adopté différentes échelles d'observations spatiales et temporelles. Nous avons étudié les caractéristiques des systèmes racinaires vivants – à l'échelle de la souche, de la racine et du cerne de croissance annuel – et analysé le phénomène de décomposition des racines après abattage des arbres.

De nombreuses techniques – souvent originales – ont été mises en œuvre (numérisation laser, tomographie RX, spectrométrie PIR, détection électrique) et de nouveaux concepts développés (typologie racinaire, dispositif expérimental de suivi de la décomposition). Au sein des chapitres développant les travaux réalisés, nous avons mis en évidence plusieurs résultats :

- La structure des systèmes racinaires dépend des conditions environnementales et notamment de la granulométrie des substrats (ou des sols). Les systèmes fasciculés se développent préférentiellement sur substrats fins et sont plus difficiles à extraire que les systèmes mixtes ou traçants croissants sur substrats grossiers.

- Sur les trois types de racines mis en évidence après analyse architecturale, certaines racines sont dangereuses vis-à-vis de la sécurité des digues, notamment les grosses racines longues et les gros pivots.

- La croissance des racines d'essences hydrophiles est très rapide dans ces milieux rivulaires. Des arbres jeunes (< 10 ans) peuvent avoir des racines de plus de 5 m de longueur avec un diamètre de départ supérieur à 5 cm. D'après la relation mise en évidence entre le diamètre et l'âge des racines, sur les zones climatiques de chaque site étudié, l'érable *negundo* se développe plus vite que le peuplier, lui-même suivi du robinier, du chêne, du mélèze et du pin sylvestre.

- La vitesse de décomposition des racines dépend des espèces végétales : sur deux années d'expérimentation, il s'est avéré que le robinier se décompose plus rapidement que le chêne, suivi du peuplier et du frêne. De plus le robinier présente un bois sensible aux variations d'humidité et se déstructure rapidement.

- Les tests de détection électrique des racines ligneuses enfouies dans divers types de matériaux ont mis en lumière la complexité de ces investigations. Les résultats peu probants obtenus en laboratoire, en conditions contrôlées, laissent une interrogation quant à l'application de cette méthode sur le terrain, nécessitant la prise en compte d'une multitude de paramètres (dont beaucoup d'inconnus) en conditions réelles.

Enfin la synthèse des observations et des résultats a permis de caractériser les impacts potentiels des enracinements d'essences ligneuses sur la sécurité des ouvrages.

La dimension de la partie aérienne de l'arbre (prise au vent – effet de levier) et la structure des enracinements (résistance à l'arrachement) influencent le risque d'érosion externe, tandis que l'architecture des racines (type, dimension et direction), leur état de décomposition (formation de galeries) ainsi que les propriétés des matériaux (aptitude à conserver les galeries) influencent le risque d'érosion interne.

Actuellement, les recommandations sécuritaires de gestion s'opposent à la présence d'essences ligneuses sur les ouvrages et préconisent le maintien d'un couvert herbacé ras. Ces consignes sont également valables en Allemagne, aux Pays-Bas, en Angleterre et aux Etats-Unis. Cependant, la nécessité d'intégration paysagère, la fonction d'accueil du public, la préservation des fonctions écologiques ont abouti au développement de véritables forêts sur les ouvrages en remblai. En effet, situés par définition à proximité de milieux aquatiques, les ouvrages en remblai sont enclins à être colonisés par des espèces ligneuses hygrophiles et ce, en seulement quelques années.

La gestion régulière de la végétation des barrages et des digues en terre est impérative pour leur sûreté, tant vis-à-vis des risques de rupture, que vis-à-vis des conditions de surveillance de ces ouvrages souvent à forts enjeux de sécurité. En France, les premières études spécifiques concernant le développement de la végétation sur les ouvrages hydrauliques en remblai, menées par le Cemagref à partir de 2003, ont concerné celle des digues. C'est sur ces ouvrages qu'un entretien rendu difficile par leur long linéaire a souvent conduit à l'installation de peuplements arborés. Ces premiers travaux sur les digues avaient permis de dégager quelques règles empiriques d'intervention, basées sur les paramètres contrôlant l'enracinement des arbres (disponibilités en eau et substances nutritives, nature, texture et compacité des matériaux du remblai).

Les études de cas examinés dans cette thèse confirment les effets négatifs de la végétation arborée se développant sur les digues à profil étroit et constituées de matériaux cohésifs. C'est seulement pour les digues à profil très large (du type de celle des aménagements hydroélectriques du Rhône) qu'une gestion plus tolérante vis-à-vis des espèces arborescentes peut être envisagée sur certaines parties de l'ouvrage.

Au terme de l'analyse, les réponses apportées aux questions scientifiques initiales permettent de formuler quelques préconisations de gestion des digues boisées.

Tout d'abord, la gestion de la végétation implantée sur les ouvrages est source d'économies substantielles, dans la mesure où les travaux de génie civil nécessaires à la remise en état des ouvrages sont souvent très onéreux.

Pour les ouvrages envahis d'arbres, l'application du principe de précaution conduit généralement à des interventions de génie civil, pour stabiliser le remblai, reconstituer le drainage ou l'étanchéité. Ces solutions efficaces sont lourdes financièrement et tardent de ce fait à être mises en œuvre par les gestionnaires, qui ne disposent pas tous des moyens nécessaires.

Les éléments développés dans cette thèse, basés sur une dizaine d'études de cas, permettront de définir des recommandations concrètes et génériques de gestion des digues et barrages boisées qu'il est envisagé de décliner dans un guide technique, en prolongement de nos travaux. Il est important de souligner que la végétation environnant les ouvrages (berge, espace entre le lit mineur et le pied de digue, val inondable) doit, elle aussi, faire l'objet d'une gestion appropriée, dans laquelle les arbres ont incontestablement leur place et contribuent à la qualité du milieu et à une meilleure insertion de l'ouvrage.

Pour les digues situées à proximité de chenaux fluviaux naturels, ces réflexions devront prendre en compte également l'évolution géomorphologique à moyen terme des systèmes fluviaux. Ceux-ci se caractérisent depuis plusieurs décennies par un ré-justement dynamique, lié à de nouvelles contraintes dans les bassins-versants. L'incision tendancielle de la plupart des planchers alluviaux des cours d'eau induit un rabattement phréatique, qui modifie l'accès à l'eau et fragilise les espèces de la ripisylve.

PERSPECTIVES

A la fin de ce travail doctoral, nous devons constater que de nombreuses pistes n'ont pas été explorées ou n'ont pas été concluantes, mais que les perspectives sont nombreuses.

Du point de vue de la structure des systèmes racinaires, les aspects de stabilisation des pentes n'ont pas été étudiés précisément. Les conclusions sur l'influence des paramètres contrôlant la morphologie des enracinements (effet majeur de la granulométrie des substrats, de l'accès à l'eau, plus que de la génétique – habituellement citée dans la littérature) pourraient être vérifiées dans d'autres milieux plus variés, tels que les berges des cours d'eau. Nos travaux pourraient cependant être transposables à d'autres domaines, en milieu urbain (dégradation des revêtements et détérioration des canalisations), en milieu fluvial et montagnard (effet de la décomposition des racines sur la stabilité des terrains en pentes). Par ailleurs, nos sites d'études se localisent essentiellement dans le quart sud-est de la France et nous n'avons que peu observé les enracinements des arbres implantés en climat montagnard ou continental.

Les travaux portant sur la modélisation dynamique n'ont été que peu développés au cours de la thèse. Le suivi du développement de jeunes arbres mériterait d'être mis en place. Cela permettrait de mettre en évidence l'âge d'apparition de certains type de racines, telles que les Courtes et de mieux appréhender les vitesses de croissance. L'élaboration d'un modèle de prévision du diamètre des racines en fonction de la dimension des arbres de franc pied pourrait être envisagée en poursuivant les analyses dendrologiques sur un nombre d'échantillons plus important.

Le suivi de la décomposition des racines, grâce aux dispositifs expérimentaux implantés sur les digues de l'Isère et de Castérino, devrait être maintenu sur les 10 prochaines années, jusqu'au terme de la dégradation des échantillons de bois. Le protocole d'étude de la décomposition sera transféré aux gestionnaires et les dates des prochains déterrages fixées avec eux.

Les analyses par SPIR seront développées dans le cadre d'un stage co-encadré par P. Vanloot (Laboratoire des Systèmes Chimiques Complexes de l'Université de St Jérôme) et auront pour objectif d'accroître la banque de données et d'établir un modèle de prédiction de l'état de décomposition en fonction de l'espèce végétale et du diamètre.

Le phénomène de décomposition devrait être étudié en conditions réelles (afin de supprimer le biais lié à la découpe des racines). Le suivi de la dégradation de souches d'arbres abattus à une date connue serait envisageable. Une expérimentation pourrait être conduite sur une portion de digue hors fonction, avec abattage d'une cinquantaine d'arbres et excavation d'une dizaine de souches en cours de décomposition tous les 2 à 3 ans sur une quinzaine d'années. Ceci permettrait également d'étudier l'impact de la décomposition sur les propriétés des matériaux du remblai (observation des galeries et des effondrements).

Les travaux portant sur la détection électrique des racines pourraient être poursuivis par essais in situ. L'injection de courant à la base des arbres vivants pourrait probablement apporter des résultats plus fiables en termes de détection des racines dangereuses pour les ouvrages. Des tests sur de petits arbres pourraient être envisagés dans un premier temps afin d'appréhender la capacité de conduction électrique par les racines vivantes.

Des investigations sur le développement des systèmes racinaires dans les ouvrages seront poursuivies dans le cadre du projet Interreg Franco-Suisse portant sur le « Génie végétal en rivière de montagne ». Ce dernier permettra de comparer les effets des racines ligneuses sur les berges et sur les digues à proximité et de prendre en compte de nouveaux paramètres, tels les effets de stabilisation ou de déstabilisation selon les caractéristiques des enracinements et l'état des racines (saines ou en décomposition).

Enfin, les travaux exposés dans cette thèse seront repris et complétés afin de constituer un guide technique à l'usage des gestionnaires de digues et barrages en remblai. Cet ouvrage destiné à la profession proposera des solutions d'aménagement et de gestion de la végétation permettant de réduire les risques d'érosion interne et externe. Ces préconisations seront généralisables aux différents types d'ouvrages hydrauliques en terre, dans le but d'optimiser le coût et l'efficacité des travaux de renforcement des ouvrages. Avec la collaboration du groupe de travail du Cemagref, je me ferais un plaisir de rédiger ce guide au cours de l'année 2011.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Note : Certaines références se trouvant dans les listes bibliographiques des articles ne sont pas répertoriées ici.

- Abernethy B and Rutherford I D (2001) The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. *Hydrological Processes* 15: 36-79. 10.1002/hyp.152
- Abernethy B and Rutherford I D (2000a) Does the weight of riparian trees destabilize riverbanks? *Regulated rivers: research & management* 16: 565-576.
- Abernethy B and Rutherford I D (2000b) The effect of riparian tree roots on the mass-stability of riverbanks. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 921-937.
- Abernethy B and Rutherford I D (1998) Where along a river's length will vegetation most effectively stabilise stream banks? *Geomorphology* 23: 55-75.
- Abu-Hamdeh N H (2001) Measurement of the Thermal Conductivity of Sandy Loam and Clay Loam Soils using Single and Dual Probes. *Journal of Agricultural Engineering Research* 80: 209-216.
- Al-Hagrey S (2006) Electrical resistivity imaging of tree trunks. *Near Surface Geophysics* 4: 179-187.
- Albrecht A, Schultze U, Liedgens M, Fluhler H and Frossard E (2002) Incorporating soil structure and root distribution into plant uptake models for radionuclides: toward a more physically based transfer model. *Journal of Environmental Radioactivity* 59: 329-350.
- Amato M, Basso B, Celano G, Bitella G, Morelli G and Rossi R (2008) In situ detection of tree root distribution and biomass by multi-electrode resistivity imaging. *Tree Physiology* 28(10): 1441-1448. doi:10.1093/treephys/28.10.1441
- Amato M, Bitella G, Rossi R, Gómez J A, Lovelli S and Gomes J J F (2009) Multi-electrode 3D resistivity imaging of alfalfa root zone. *European Journal of Agronomy* 31: 213-222. doi:10.1016/j.eja.2009.08.005
- Atger C (1991) L'architecture racinaire est-elle influencée par le milieu? *L'arbre, biologie et développement* 71-84.
- Atger C and Edelin C (1994a) Premières données sur l'architecture comparée des systèmes racinaires et caulinaires. *Canadian Journal of Botany* 72: 963-975.
- Atger C and Edelin C (1994b) Stratégie d'occupation du milieu souterrain par les systèmes racinaires des arbres. *Ecologie* 49: 343-356.
- Atger C and Edelin C (1995) Un cas de ramification sympodiale à déterminisme endogène chez un système racinaire : *Platanus hybrida*. *Acta Botanica Gallica* 142: 23-30.
- Barker R, Dixon L and Hooke J (1997) Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion. *Earth Surface Processes and Landforms* 22: 1217-1227.
- Barthélémy D, Blaise F, Fourcaud T and Nicolini E (1995) Modélisation et simulation de l'architecture des arbres : bilan et perspectives. *Revue Forestière Française* 47: 71-96.
- BAW (2005) Circulaire Allemande : Stabilité des Digue (Merkblatt standsicherheit von dämmen an bundeswasserstraben). In *Circulaire Stabilité des digues sur les voies d'eau fédérales allemandes*, Ed B f W (BAW). pp 40. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe.
- Blais J-P (2005) Typologie de l'érosion interne et érosion externe des digues fluviales : une courte revue bibliographique *Ingénieries EAT N°spécial*: 65-70.
- Blaise F and Reffye P (1994) Simulation de la croissance des arbres et influence du milieu: le logiciel AMAPpara. 61-75.
- Bodoque J M, Díez-Herrero A, Martín-Duque J F, Rubiales J M, Godfrey A, Pedraza J, Carrasco R M and Sanz M A (2005) Sheet erosion rates determined by using dendrogeomorphological analysis of exposed tree roots: Two examples from Central Spain. *CATENA* 64: 81-102.
- Böhm W (1979) *Methods of studying root systems*. Springer, Berlin. 150 p.
- Butnor J, Doolittle J, Kress L, Cohen S and Johnsen H (2001) Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. *Tree Physiology* 21: 1269-1278. doi:10.1093/treephys/21.17.1269
- Cermak J, Hruska J, Martinkova M and Prax A (2000) Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetrating radar and sap flow techniques. *Plant and Soil* 219: 103-116.
- Chandioux O, Vennetier M, Esteve R and Ripert C (2005) *Etude de la végétation des digues du Rhône : rapport final*. pp 74. Cemagref, Aix en Provence.
- Clark J and Robson S (2004) Accuracy of Measurements Made with A Cyrax 2500 Laser Scanner Against Surfaces of Known Colour. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 35: 1031-1036.
- Clément P (1993) Erosion balance and slope evolution under continental humid temperate climate: An appalachian example (Quebec, Canada) *CATENA* 20: 303-315.

- Costa A and Pereira H (2006) Decision Rules for Computer-Vision Quality Classification of Wine Natural Cork Stoppers American Journal of Enology and Viticulture 57: 210-190.
- Coutts M, Nielsen C and Nicoll B (1999) The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers. Plant and Soil. 217: 1-15.
- Daly F, Chapital L and Personne C (2005) État des lieux patrimonial des digues de canaux de navigation en France. Ingénieries EAT N° spécial: 23-30.
- Danjon F, Barker D H, Drexhage M and Stokes A (2008) Using Three-dimensional Plant Root Architecture in Models of Shallow-slope Stability. Annals of Botany 101: 1281-1293. doi:10.1093/aob/mcm199
- Danjon F, Bert, Godin C and Trichet P (1999a) Structural root architecture of 5-year-old Pinus pinaster measured by 3D digitising and analysed with AMAPmod. Plant and Soil 217: 49-63.
- Danjon F and Fourcaud T (2009) L'arbre et son enracinement. Innovations Agronomiques 6: 17-37.
- Danjon F, Sinoquet H, Godin C, Colin F and Drexhage M (1999b) Characterisation of structural tree root architecture using 3D digitising and AMAPmod software. Plant and Soil 211: 241-258.
- Dean C (2003) Calculation of Wood Volume and Stem Taper Using Terrestrial Single-Image Close-Range Photogrammetry and Contemporary Software Tools. Silva Fennica 37: 359-380.
- Di-Iorio A, Lasserre B, Scippa G and Chiatante D (2005) Root System Architecture of Quercus pubescens Trees Growing on Different Sloping Conditions. Annals of Botany 95: 351-361.
- Dorlodot S, Foster B, Pagès L, Price A, Tuberosa R and Draye X (2007) Root system architecture : opportunities and constraints for genetic improvement of crops. Trends in Plant Science 12: 474-481.
- Drenou C (2006) Les racines - face cachée des arbres. Institut pour le Développement Forestier, Paris. 335 p.
- Drexhage M, Chauvière M, Colin F and Nielsen C (1999) Development of structural root architecture and allometry of Quercus petraea. Canadian Journal of Forest Research 29: 600-608.
- Drexhage M and Gruber F (1998) Architecture of the skeletal root system of 40-year-old Picea abies on strongly acidified soils in the Harz Mountains -Germany. Canadian Journal of Forest Research 28: 13-22.
- Dupuy L (2003) Modélisation de l'ancrage racinaire des arbres forestiers. In Ecole doctorale de sciences physiques et de l'ingénieur. pp 135. Université Bordeaux 1.
- Dupuy L, Fourcaud T and 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 and Stokes A (2005b) A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. Plant and Soil 278: 119-134.
- DVWK (1993) Recueil des recommandations de gestion et informations législatives allemandes Deutscher Verband fur Wasserwirtschaft und Kulturbau.
- Edmonds R, Vogt D, Sandberg D and Driver C (1986) Decomposition of Douglas -fir and red alder wood in clear cuttings. Canadian Geotechnical Journal 16: 822-831.
- FEMA (2005) Technical manual for dam owners - Impacts of plants on earthen dams. pp 115. Federal Emergency Management Agency, Us Department of Homeland Security.
- Fitter A (2002) Characteristics and functions of root systems. In Plant Roots - The hidden half, Eds Y Waisel and A Eshel. pp 15-32. Dekker, New York.
- Fitter A and Stickland T (1991) Architectural analysis of plant root systems 2. Influence of nutrient supply on architecture in contrasting plant species. New Phytologist 118: 383-389.
- Fourcaud T, Dupuy L, Sellier D, Ancelin P and Lac P (2004) Analysis of the relationship between tree structure and biomechanical functions. In 4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models, Montpellier, France Eds LRBB, U CNRS and INRA. pp 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, Ed IDF. pp 124-133. Paris.
- Frey B, Hagedorn F and Giudici F (2006) Effect of girdling on soil respiration and root composition in a sweet chestnut forest. Forest Ecology and Management 225, 271-277.
- Freyburger C, Longuetaud F, Mothe F, Constant T and Leban J-M (2009) Measuring wood density by means of X-ray computer tomography. Annals of Forest Science 66: 1-9. DOI: 10.1051/forest/2009071
- Fry, JJ (2010) Erosion interne des ouvrages hydrauliques, La Revue Technique des Travaux Publics, 869, pp. 78-84
- Gärtner H (2006) The applicability of roots in Dendrogeomorphology. In TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology. Ed Schleser. pp 120-124.
- Gärtner H (2007) Tree roots-Methodological review and new development in dating and quantifying erosive processes. Geomorphology 86: 243-251.
- Gärtner H and Denier C (2006) Application of a 3D Laser scanning device to acquire the structure of whole root systems - A pilot study. In TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology 4, Proceedings of the Dendrosymposium 2005 April 21st-23rd 2005. Eds Heinrich, I Gärtner, H Monbaron, M Schleser and G. pp 288-294.

- Gärtner H, Wagner B, Heinrich I and Denier C (2009) 3D-laser scanning: a new method to analyze coarse tree root systems. *Forest Snow and Landscape Research* 82: 95–106.
- Giger S (1985) Revue sur les méthodes de dosage de la lignine utilisées en alimentation animale. *Annals of Zootechnology* 34: 85-122.
- Godin C, Costes E and Caraglio Y (1997a) Exploring plant topological structure with the AmapMod software : an outline. *Silva Fennica* 31: 355-366.
- Godin C, Guédon Y, Costes E and Caraglio Y (1997b) Measuring and analysing plants with the Amapmod software. *Advances in Computational Life Science* 53-84.
- Hagglund E (1951) *Chemistry of Wood*. New York: Academic Press 115: 320. DOI: 10.1126/science.115.2986.320
- Hargreaves C E, Gregory P J and Bengough A G (2009) Measuring root traits in barley (*Hordeum vulgare* ssp. *vulgare* and ssp. *spontaneum*) seedlings using gel chambers, soil sacs and X-ray microtomography. *Plant and Soil* 316: 285-297. DOI 10.1007/s11104-008-9780-4
- Hitz O M, Gärtner H, Heinrich I and Monbaron M (2008) Application of ash (*Fraxinus excelsior* L.) roots to determine erosion rates in mountain torrents. *CATENA* 72: 248-258.
- Inari G N, Mounguengui S, Dumarçay S, Pétrissans M and Gérardin P (2007) Evidence of char formation during wood head treatment by mild pyrolysis. *Polymer Degradation and Stability* 92: 997-1002.
- Ingram K and Leers G (2001) Software for Measuring Root Characters from Digital Images. *Agronomy Journal* 93: 918-922.
- Jones P D, Schimleck L R, Peter G F, Daniels R F and Clark A (2006) Nondestructive estimation of wood chemical composition of sections of radial wood strips by diffuse reflectance near infrared spectroscopy. *Wood Science and Technology* 40: 709-720. DOI 10.1007/s00226-006-0085-6.
- Jourdan C and Rey H (1997) Architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. *Plant and Soil* 189: 33-48.
- Kelley S S, Rials T G, Snell R, Groom L H and Sluiter A (2004) Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. *Wood Science and Technology* 38: 257-276.
- Kersten M S (1952) Thermal properties of soils. Highway Research Board Special Report 2: 161-166.
- Köstler J N, Bruckner E and Bibelriether G (1968) Die wurzeln der waldbaume - untersuchungen zur morphologie der waldbaume in mitteleuropa, Hamburg und Berlin. 1-284 p.
- Krause C and Eckstein D (1994) Dendrochronology of roots. *Dendrochronologia* 11: 9-23.
- Krause C and Morin H (1999) Root growth and absent rings in mature black spruce and balsam fir, Quebec, Canada. *Dendrochronologia* 16: 21-35.
- Lee P and Sturgess K (2001) The effects of logs, stumps, and root throws on understory communities within 28-year-old aspen-dominated boreal forests. *Canadian Journal of Botany* 79: 905-916.
- Longuetaud F (2005) Détection et analyse non destructive de caractéristiques internes de billons d'épicéa commun (L. Karst.) par tomographie à rayons X. *In Sciences Forestières et du Bois*. pp 124. Thèse, ENGREF INRA Nancy.
- Longuetaud F, Sabatier R and Nepveu G (2001) Identification des critères de qualités déterminant les aptitudes à l'emploi de grume de Hêtre par un pannel de professionnels ENSAM & Université de Montpellier II.
- Lorenzo H and Arias P (2005) A Methodology for Rapid Archaeological Site Documentation Using Ground-Penetrating Radar and Terrestrial Photogrammetry. *Geoarchaeology: An International Journal* 20: 521-535.
- Lucot E and Bruckert S (1992) Organisation du système racinaire du chêne pédonculé (*Quercus robur*) développé en conditions édaphiques non contraignantes (sol brun lessivé colluvial). *Annales Des Sciences Forestières* 49: 465-479.
- Ludovici K H and Kress L W (2006) Decomposition and nutrient release from fresh and dried pine roots under two fertilizer regimes. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 105-111.
- Ludovici K H, Zarnoch S J and Richter D D (2002) Modeling in-situ pine root decomposition using data from a 60-year chronosequence. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 1675-1684.
- Malik I (2008) Dating of small gully formation and establishing erosion rates in old gullies under forest by means of anatomical changes in exposed tree roots (Southern Poland). *Geomorphology* 93 421-436.
- Malkavaara P and Alén R (1998) A spectroscopic method for determining lignin content of softwood and hardwood kraft pulps. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 44: 287-292.
- Martin T (2009a) Anwendung des komplexen elektrischen Widerstandsverfahrens an Eichen (*Quercus* spp.). *In BAM Dissertationsreihe*, Berlin.
- Martin T (2009b) Complex resistivity (CR) of wood and standing trees. *In Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Nantes, France June 30th-July 3rd. Ed NDTCE'09. pp 963-968.
- Mattheck V C and Breloer H (1992) Der wurzelquerschnitt als protokoll der lastgeschichte. *Allg Forest U Ztg* 163: 142-145.

- Mazet-Brachet D (1984) Glissements de terrains sous forêts, étude du site de Roissard -peuplement artificiel de pins noirs sur marnes callovo-oxfordiennes, Ed U d Grenoble. pp 21. RFF.
- Menon M, Robinson B, Oswald S E, Kaestner A, Abbaspour K C, Lehmann E and Schulin R (2007) Visualization of root growth in heterogeneously contaminated soil using neutron radiography. *European Journal of Soil Science* 58: 802-810.
- Mériaux P, Vennetier M, Aigouy S, Hoonakker M and Zylberblat M (2006) Diagnostic et gestion de la végétation sur les digues et barrages en remblai. *Commission Internationale des Grands Barrages 22^e Congrès des Grands Barrages*: 1-19.
- Mériaux P, Wolff M and Folton C (2003) Recensement national des digues de protection contre les inondations. État d'avancement de l'opération, premiers résultats et perspectives. *Ingénieries - E A T* p. 113-126.
- Mulia R (2005) Modélisation tri-dimensionnelle de la croissance du système racinaire des plantes en milieu hétérogène avec l'approche de l'automate voxellaire - concepts de modélisation et application à des arbres agroforestiers. pp 94. Université Montpellier II Sciences et Techniques, Montpellier.
- Mulia R and Dupraz C (2006) Unusual fine root distributions of two deciduous tree species in southern France: What consequences for modelling of tree root dynamics? *Plant and Soil* 281: 71-85.
- Nadezhkina N and Cermak J (2003) Instrumental methods for studies of structure and function of root systems of large trees. *Journal of Experimental Botany* 54: 1511-1521. doi: 10.1093/jxb/erg154
- Nicolotti G, Socco L V, Martinis R, Godio A and Sambuelli S (2003) Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. *Journal of Arboriculture* 29: 66-78.
- Nilaweera N and Nulalaya P (1999) Role of tree roots in slope stabilisation. *Bulletin of engineering geology and the environment* 57: 337-342.
- Norme NF P 94-055 Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un sol - méthode chimique (12/1993)
- Norme NF P 94-056 : Analyse granulométrique des sols - Méthode par tamisage à sec après lavage (03/1996)
- Norme NF P 94-057 : Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation (05/1992)
- Norme NF P 94-400-1 : Reconnaissances et essais géotechniques – dénomination, description et classification des sols
- Norme GTR NFP 11-300 : Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais (09/1992).
- Norris J and Greenwood J (2003) Root reinforcement on unstable slopes in Northern Greece and Central Italy. *In* An International Conference on Problematic Soils, Nottingham, United Kingdom. pp 8.
- Oppelt A, Kurth W, Dzierzon H, Jentschke G and Godbold D (2000) Structure and fractal dimensions of root systems of four co-occurring fruit tree species from Botswana. *Annals of Forest Science* 57: 463-475.
- Osterkamp W R, Toy T J and Lenart M T (2006) Development of partial rock veneers by root throw in a subalpine setting. *Earth Surface Processes and Landforms* 31: 1-14.
- Osterloh K R S, Bücherl T, Hasenstab A, Rädcl C, Zscherpel U, Meinel D, Weidemann G, Goebbels J and Ewert U (2007) Fast Neutron Radiography and Tomography of Wood as Compared to Photon Based Technologies. *In* International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography, Lyon, France June 25-27. Ed F I f M R a Testing
- Pagès L, Doussan C and Vercambre G (2000) An introduction on below-ground environment and resource acquisition, with special reference on trees. Simulation models should include plant structure and function. *Annals Forestry Sciences* 57: 513-520. doi:10.1051/forest:2000138
- Petersen T and Al-Hagrey S (2009) Mapping root zones of small plants using surface and borehole resistivity tomography. *The Leading Edge* 28: 1220-1224. doi:10.1190/1.3249778
- Phattaralerphong J and Sinoquet H (2000) Tree Analyser : software to compute tree structure parameters from photographs, Ed U PIAF INRA, Clermont Ferrand.
- Piégay H, Pautou G, Ruffinoni C (2003) Les forêts riveraines des cours d'eau. *Ecologie, fonctions et gestion*, Paris. 464 p.
- Pollen N (2007) Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture. *CATENA* 69: 197-205. doi:10.1016/j.catena.2006.05.004
- Preston C M, Trofymow J A T, Niu J and Sayer B G (1997) ¹³C nuclear magnetic resonance spectroscopy with cross-polarization and magic-angle spinning investigation of the proximate-analysis fractions used to assess litter quality in decomposition studies. *Canadian Journal of Botany* 75: 1601-1613.
- Raymond C A and Poke F S (2006) Predicting extractives, lignin, and cellulose contents using near infrared spectroscopy on solid wood in *Eucalyptus globulus*. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 26: 187-199.
- Reubens B, Poesen J, Danjon F, Geudens G and 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* 21: 385-402.
- Rowell R M (2005) Handbook of wood chemistry and wood composites. CRC Press. 487 p.
- Royet P and Mériaux P (1998) Sécurité des barrages et des digues. *Ingénieries – EAT N°* sp: 59-67.

- Rubiales J M, Bodoque J M, Ballesteros J A and Diez-Herrero A (2008) Response of *Pinus sylvestris* roots to sheet-erosion exposure: an anatomical approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8: 223-231.
- Ruffet C, Gueguen Y and Darot M (1991) Complex conductivity measurements and fractal nature of porosity. *Geophysics* 56: 758-768.
- Šamonil P, Král K and Hort L (2010) The role of tree uprooting in soil formation: A critical literature review. *Geoderma* 157: 65-79.
- Sandstrom F, Petersson H, Kruys N and 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* 243: 19-27.
- Schimleck L R, Evans R and Ilic J (2001) Estimation of *Eucalyptus delegatensis* wood properties by near infrared spectroscopy. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 1671-1675.
- Schleifer N, Weller A, Schneider S and Junge A (2002) Investigation of Bronze Age plankway by Spectral Induced Polarisation. *Archeological Prospection* 9: 243-253. doi:10.1002/arp.194
- Schmidt K, Roering J, Stock J, Dietrich W, Montgomery D and Schaub T (2001) The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Canadian Geotechnical Journal* 38: 995-1024.
- Simon A and Pollen N (2004) Assessing the Relative Timing and Contribution of Mechanical and Hydrologic Effects of Vegetation on Streambank Stability, Oxford, MS, USA. Eds USDA-ARS, N S Laboratory and pp 38.
- Sinoquet H and Rivet P (1997) Measurement and visualization of the architecture of an adult tree based on a three-dimensional digitising device. *Trees* 11: 265-270.
- Sinoquet H, Rivet P and Godin C (1997) Assessment of the three dimensional architecture of walnut trees using digitising. *Silva Fennica* 31: 265-273.
- Soethe N, Lehmann J and Engels C (2007) Root tapering between branching points should be included in fractal root system analysis. *Ecological Modelling* 207: 363-366.
- Stokes A (1999) Strain distribution during anchorage failure of *Pinus pinaster* Ait. at different ages and tree growth response to wind-induced root movement. *Plant and Soil* 217: 17-27.
- Stokes A, Fourcaud T, Hruska J, Cermak J, Nadyezhdina N, Nadyezhdin V and Praus L (1999) An evaluation of different methods to investigate root systems architecture of urban trees in situ : I ground penetrating radar. *Journal of Arboriculture* 28: 2-10.
- Stokes A and Mattheck C (1996) Variation of wood strength in tree roots. *Journal of Experimental Botany* 47: 693-699.
- STOWA (2002) Suplemments to the reports on vegetation on and near flood defences Fondation for Applied Research in Water Management (Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer), Amersfoort, Netherland.
- STOWA (2000) Trees on and near flood defences - background report Fondation for Applied Research in Water Management (Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer), Amersfoort, Netherland.
- Tamasi E, Stokes A, Lasserre B, Danjon F, Berthier S, Fourcaud T and Chiatante D (2005) Influence of wind loading on root system development and architecture in oak (*Quercus robur* L.) seedlings. *Trees* 19: 374-384.
- TAW (1999) Grass cover as a dike revetment. pp 18. Technical Advisory Committee for Flood Defence in The Netherlands.
- TAW (1994) Guide for the design of river dikes. pp 210. Technical Advisory Committee on Water Defences (TAW) and Center for civil engineering resarch and codes (CUR).
- Testamale JP, Parron C, Royet P, Faure YH, Lambert S, Fagon Y (1999) Filtre géotextile du barrage de Torcy-Vieux (71) : prélèvements et analyses. *Rencontres géosynthétiques* 99, Bordeaux, 12-13 octobre 1999, p. 311-318.
- Tobin B, Black K, McGurdy L and Nieuwenhuis M (2007) Towards a Methodology for Coarse Woody Débris C-stock Estimation. *Forestry* 80: 455-469. DOI: 10.1093/forestry/cpm024
- US-ARMY (2008) Documentation and analysis of tree root extend and behaviour along and in levees and floodwalls in the New Orleans district. pp 185. US ARMY Corps of Engineers, JESCO, GEC, LSU, New Orleans.
- Vennetier M, Chandioix O, Ripert C and Mériaux P (2004) Diagnostic et gestion de la végétation sur ou dans l'environnement des digues. pp 1-18. Cemagref, Aix en Provence.
- Watson A, Phillips C and 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* 217: 39-47.
- Weatherwax R C and Stamm A J (1945) The Electrical Resistivity or Resin-Treated Wood and Laminated Hydrolyze-Wood and Paper-Base Plastics. *American Institute of Electrical Engineers* 64: 833 - 838. DOI : 10.1109/T-AIEE.1945.5059050

- Weber V K and Mattheck C (2005) Die doppelnatur der wurzelplatte. *Allg Forest U Ztg* 176: 77-85.
- Weihs U, Dubbel V, Krummheuer F and Just A (1999) The electrical resistivity tomography - a promising technique for detection of coloured heartwood on standing beech trees (in German). *Forst und Holz* 54: 166-170.
- Weller A, Nordsiek S and Bauerochse A (2006) Spectral induced polarisation - a Geophysical method for archeological prospection in peatlands. *Journal of Wetland Archeology* 6: 105-125.
- Wielopolski L, Hendrey G, Daniels J and MCGuigan M (2002) Imaging Tree Root Systems In Situ (GPR). *In* international conference on ground penetrating radar N°9, Etat-Unis pp 58-62.
- Yeh T-F, Yamada T, Capanema E, Chang H-M, Chiang V and Kadla J F (2005) Rapid screening of wood chemical component variations using transmittance near-infrared spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53: 3328-3332.
- Zenone T, Morelli G, Teobaldelli M, Fischanger F, Matteucci M, Sordini M, Armani A, Ferrè C, Chiti T and Seufert G (2008) Preliminary use of ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography to study tree roots in pine forests and poplar plantations. *Functional Plant Biology* 35: 1047-1058.

GLOSSAIRE

- Appareil caulinaire : partie aérienne de la plante constituée de la tige, des branches et des rameaux.
- Boulance : désigne le déplacement latéral d'un sol granuleux peu compact, ou du sable, lorsqu'ils sont soumis à une pression de haut en bas.
- Conductivité électrique : aptitude d'un matériau à laisser les charges électriques se déplacer librement, autrement dit à permettre le passage du courant électrique.
- Duraminisation : Processus de transformation de l'aubier en duramen. Passage des cellules vivantes de l'aubier vers l'état de cellules mortes, qui se chargent de dépôts de sécrétion et de pigments. Le duramen est généralement moins sensible aux attaques biologiques que l'aubier.
- Fontis : effondrement du sol en surface, causé par la déliquescence souterraine progressive des terrains porteurs.
- Fruit : inverse de la pente (la pente étant la tangente de l'angle du talus par rapport à l'horizontale. Ex : une pente de 50/100 ou 1V/2H ou 0,5 ou 50% correspond à un fruit de 1/0,5, soit un fruit de 2. Plus le fruit est faible plus la pente est forte.
- Mycorhize : associations symbiotiques entre les racines des végétaux avec certains champignons du sol, favorisant l'absorption par les racines des éléments minéraux de la rhizosphère et du sol.
- Ontogénique : qualifie ce qui est relatif au développement de l'individu.
- Plagiotropisme : orientation oblique des rameaux d'une plante, due à l'action de la pesanteur sur la répartition des auxines (auxines : substance assurant la croissance en longueur et l'orientation des axes végétaux - tiges et racines).
- Recépage : action de couper un arbre près de terre afin d'obtenir de nouvelles pousses.
- Résistivité électrique : capacité d'un matériau à s'opposer à la circulation du courant électrique.

LISTE DES SIGLES

- CNR: Compagnie Nationale du Rhône
- EDF : Electricité de France
- SMAVD : Syndicat Mixte d'Aménagement de la Vallée de la Durance
- AD IDR : Association Départementale Isère-Drac-Romanche
- DDT : Direction Départementale des Territoires
- SYMADREM : Syndicat Mixte interrégional d'Aménagement des Dignes du delta du Rhône et de la Mer

LISTE DES FIGURES, PHOTOS ET TABLEAUX

PREMIERE PARTIE

- Figure I.1 :** Architecture racinaire de deux espèces arborescentes à trois stades de leur développement. (a) *Laetia procera* : le pivot a une extension verticale limitée, des racines horizontales à développement tardif (en noir) recolonisent la proximité du tronc (réitération proleptique). (b) *Goupia glabra* : une couronne de pivots surnuméraires (en gris) se développent progressivement à partir des racines charpentières, au cours de la croissance de l'arbre. Ces deux espèces poussant dans le même milieu, en Guyane, ont des aptitudes de croissance et des modalités de développement différentes (Atger 1991).....11
- Figure I.2 :** 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 granulométriques, développement de ramifications latérales et mise en place d'un système racinaire de type traçant (Foussadier 2003) 12
- Figure I.3 :** Evolution de la densité racinaire du saule blanc dans un sol stratifié. L'alternance de couches sédimentaires 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).....12
- Figure I.4 :** Synthèse des paramètres influençant la stabilité des terrains (Fourcaud et al., 2004 et Reubens et al., 2007) 15
- Figure I.5 :** Présentation du dispositif du numériseur.....16
- Figure I.6 :** Reconstruction sous AMAPmod du système racinaire d'un chêne, âgé de plus de 60 ans, implanté sur un terrain en pente. (a) : Vue verticale, (b) : Vue perpendiculaire (Danjon et al., 2008) 17
- Figure I.7 :** Les trois échelles d'observation et d'analyse de la structure de la partie aérienne d'un arbre et la représentation MTG associée, Godin et al., 1997b, modifiée. (a) : représentation morphologique globale avec les axes principaux (style d'architecture), (b) : échelle des unités de croissance ou segments, (c) : échelle des internœuds, (d) : représentation graphique multi-échelle..... 18
- Figure I.8 :** (a) Reconstruction 3D du système racinaire à partir de quatre scans réalisés par le laser et des balises repère. (b) Zoom ; flèches noires = racines de 4-5mm de diamètre et flèches blanches = nuages représentant les racines inférieures à 2mm dont la perception imprécise ne permet pas une représentation continue (Gartner et Denier, 2006) 20

Figure I.9 : Reconstruction d'un arbre par voxélisation, à partir des données obtenues par balayages laser, (a) : vue perpendiculaire, (b) : vue verticale, (c) : zoom. (Fournier et Côte, 2006)	21
Figure I.10 : Paramétrage des prises de vue. (Phattaralerphong et Sinoquet, 2005)	22
Figure I.11 : Radargramme obtenu avec le SIR 2000, 1,5 GHz. Profondeur en cm sur l'axe des ordonnées. Matériaux sableux drainants. L'origine des réflexions a été vérifiée après excavation : il s'agit de racines de <i>Populus Deltoides</i> (A) 0,6 cm de diamètre à 11 cm de profondeur, (B) 1,7 cm de diamètre à 14 cm de profondeur, (C) 3 racines regroupées de 1,5, 0,7 et 0,7 de diamètre à 27 cm de profondeur et (D) racine en surface (Butnor et al., 2001).	29
Tableau I.1 : Les différentes conditions d'érosion (Fry, 2010).....	8
Tableau I.2 : Caractéristiques architecturales des racines.....	10
Tableau I.3 : Impacts des arbres et de leur système racinaire sur la stabilité des terrains (Nilaweera and Nutalaya, 1999 ; Albernethy and Rutherford, 2000, 2001 ; Watson et al, 1999 ; Schmidt et al., 2001 ; Norris and Greenwood, 2003 ; Danjon et al., 2008 ; Pollen, 2007 ; Reubens et al., 2007).....	13
Tableau I.4 : Effets mécanique et hydrologique des paramètres architecturaux sur la stabilité des pentes (Reubens et al., 2007).....	14
Tableau I.5 : Table de données affichée sous le programme Diplami, (Danjon et al., 1999)	18

DEUXIEME PARTIE

Figure II.1 : Localisation des 8 sites d'étude.....	34
Figure II.2 : Secteur d'étude sur Donzère (A à gauche, B à droite).....	36
Figure II.3 : Secteurs d'étude sur Montélimar (C et E à gauche et D à droite).....	37
Figure II.4 : Courbes granulométriques des matériaux représentatifs de la constitution des digues de Donzère et Montélimar (le nom des courbes correspond à l'espèce et au numéro des arbres).....	38
Figure II.5 : Localisation des arbres sur le parement aval, secteur 1 et 2.....	39
Figure II.6 : Localisation des arbres sur le parement aval, secteur 3.....	39
Figure II.7 : Courbes granulométriques des matériaux représentatifs de la constitution de la digue du canal de Jonage (parement aval)	41
Figure II.8 : Situation de la Digue du Père Grand à Pertuis	42
Figure II.9 : Courbe granulométrique des matériaux représentatifs de la constitution du talus côté terre de la digue de protection contre les crues de la Durance à Pertuis.....	42
Figure II.10 : Localisation des arbres sélectionnés (cercles verts) et de la zone d'expérimentation.....	43
Figure II.11 : Courbes granulométriques des matériaux représentatifs de la constitution de la digue de l'Isère sur les différents secteurs d'étude	45
Figure II.12 : Localisation du secteur d'étude sur les levées de la Loire.....	45
Figure II.13 : Vue aérienne de la zone d'étude : état de boisement de la levée	46
Figure II.14 : Courbes granulométriques des matériaux représentatifs de la constitution de la digue de la Loire sur les différents secteurs d'étude.....	46
Figure II.15 : Localisation du barrage de Castérino.....	48
Figure II.16 : Localisation de la digue de fermeture et de la prise d'eau de Castérino.....	48
Figure II.17 : Courbes granulométriques des matériaux représentatifs de la constitution de la digue du barrage de Castérino	49
Figure II.18 : Localisation du barrage de Monjoux	50

Figure II.19 : Courbes granulométriques des matériaux représentatifs de la constitution du parement aval du barrage de Monjoux, dans la zone du futur évacuateur.	51
Figure II.20 : Plan du dispositif sur la digue de l'Isère : organisation des paniers et des échantillons	56
Figure II.21 : Plan du dispositif sur la digue de Castérino : organisation des paniers et des échantillons	57
Figure II.22 : Panier type du dispositif principal sur la digue de l'Isère	57
Figure II.23 : Panier test sur la digue de l'Isère et panier type sur la digue de Castérino...	58
Figure II.24 : Principe de fonctionnement du scanner médical (TOMO ADOUR, 2010).....	63
Figure II.25 : Histogramme des masses volumiques d'une coupe de bois de racine sous IMAGE J.....	65
Figure II.26 : Droite de régression linéaire pour le filtre de reconstruction Detail, en encadré vert équation de calibration pour la conversion de la masse volumique des unités Hounsfield (H) en kg/m ³ (Freyburger et al., 2009).	65
Figure II.27 : Schéma du dispositif de pesée (J.Chave, 2005).....	66
Figure II.28 : Interféromètre de Michelson (Chalus et al., 2005)	67
Photo II.1: Digue du canal du Rhône à Montélimar (RG).....	36
Photo II.2 : Digue du canal du Rhône à Lyon (RD)	39
Photo II.3 : Digue de l'Isère à Tencin.....	43
Photo II.4 : Levée de la Loire à Cosne-sur-Loire.....	46
Photo II.5 : Digue de fermeture du barrage de Castérino.....	48
Photo II.6 : Barrage de Monjoux vue depuis la retenue d'eau.....	50
Photo II.7 : Elingage d'une souche de pin sylvestre à Castérino.....	52
Photo II.8 : (a) Numérisation d'une souche de chêne à Lyon (Laser Riegl) et (b) nuage de points associé.....	54
Photo II.9 : Mesure manuelle des racines sur une souche de robinier à Lyon.....	54
Photo II.10 : Découpe des racines.....	58
Photo II.11 : Prélèvement et référencement des échantillons.....	58
Photo II.12 : Mesure et pesée des échantillons.....	59
Photo II.13 : Terrassement de la zone expérimentale.....	59
Photo II.14 : Etiquetage des échantillons.....	59
Photo II.15 : Mise en place des paniers.....	59
Photo II.16 : Enfouissement des échantillons.....	59
Photo II.17 : Mise en place du grillage avertisseur.....	59
Photo II.18 : Remblaiement de la zone.....	59
Photo II.19 : Reconstitution du talus de digue.....	60
Photo II.20 : Test de pénétrométrie au couteau sur les échantillons décomposés.....	61
Photo II.21: Scanner Medical General Electric Brightspeed Exel (INRA.....	63
Photo II. 22 : Calage des échantillons avant balayage par le scanner.....	64
Photo II.23 : Découpe des échantillons en lamelles de 2 cm d'épaisseur.....	67
Tableau II.1: Caractéristiques des arbres étudiés sur chaque site d'étude.....	35
Tableau II.2 : Caractéristiques des arbres et souches sélectionnés sur les secteurs de Donzère.....	36
Tableau II.3 : Caractéristiques des arbres et souches pourries sélectionnés sur les secteurs de Montélimar.....	37
Tableau II.4: Synthèse des caractéristiques des arbres et souches pourries extraits sur le parement aval de la digue du canal de Jonage.....	40

Tableau II.5 : Synthèse des caractéristiques des arbres et arbustes arrachés sur le parement amont de la digue du canal de Jonage.....	40
Tableau II.6 : Références des arbres sélectionnés sur les digues de l'Isère.....	44
Tableau II.7 : Caractéristiques des arbres étudiés sur les levées de la Loire.....	47
Tableau II.8 : Références des arbres excavés à Castérino.....	49
Tableau II.9 : Fractions granulaires (Norme NFP 94-400-1)	53
Tableau II.10 : Tableau de caractérisation qualitative des racines par classes de dégradation (d'après Lee and Sturgess, 2001, Tobin et al., 2007)	60
Tableau II.11 : Classification par test de pénétrométrie au couteau (Renvall, 1995)	61
Tableau II.12 : Caractéristiques des différents collaborateurs potentiels (S.Ferrat, 2010)..	62

TROISIEME PARTIE

Figure III.Ch1.1 : Souche d'aulne à morphologie duale, structure racinaire spécifique côté canal (racines fines absorbantes) et côté digue (racines ligneuses d'ancrage)	85
Figure III.Ch1.2 : Racines fines absorbantes s'étant développées en condition immergée ..	86

Figure III.Ch3.1 : Caractéristiques macroscopique du bois (Schweingruber 1982).....	109
Figure III.Ch3.2 : Caractéristiques microscopique du bois de feuillus (Schweingruber 1982)	110
Figure III.Ch3.3 : Différence de résistance à la dégradation du bois entre les parties interne, périphérique et l'écorce.....	110
Figure III.Ch3.4 : Position des 8 sondes thermiques enterrées dans la digue et dans le sol....	120
Figure III.Ch3.5 : Variations des températures dans la digue et dans le sol.....	120

ARTICLE I

Figure 1 : Racine traçante Grosse de type Longue (Frêne)
Figure 2 : Racine oblique Grosse de type Courte (Frêne)
Figure 3 : Taux de décroissance moyen par type racinaire. Le rectangle délimite les deux quartiles centraux, séparés par la médiane, la croix indique la moyenne, les barres indiquent les 10ème et 90ème percentiles et les points les valeurs extrêmes.
Figure 4 : Taux de ramification moyen par type racinaire Le rectangle délimite les deux quartiles centraux, séparés par la médiane, la croix indique la moyenne, les barres indiquent les 10ème et 90ème percentiles et les points les valeurs extrêmes.
Figure 5 : Croisement des taux de décroissance et de ramification selon le type de racine, la taille et le matériau, toutes essences confondues. Chaque groupe est positionné au centre de gravité des points qu'il représente. Les différences significatives entre groupes sur chaque axe sont notées dans le Tableau 4.
Figure 6 : Représentation diagramme des modèles topologiques "dichotomique" (a) et "en arrête de poisson" (b) (Fitter 2002)

Tableau 1: Sites des interventions menées sur les digues, nombre, espèce et âge des arbres étudiés. DBH = diameter at breast height

Tableau 2 : Nombre d'arbres et de racines mesurées par espèces, longueur totale et nombre de segments

Tableau 3: Longueur des racines selon leur type et en fonction des matériaux. Moyennes calculées à partir de 282 racines mesurées jusqu'à leur extrémités.

Tableau 4 : Comparaison à l'aide du test de Nemenyi, pour les taux de décroissance et de ramification, des groupes de racines combinant : type, taille et matériaux. Les groupes

marqués d'une même lettre ne diffèrent pas statistiquement. Le croisement de ces deux variables est visualisé dans la Figure 5.

Tableau 5 : défilement par taille de racine et distribution du défilement par diamètres.

Tableau 6 : Comparaison des défilements sur matériaux fins et grossiers par combinaison type / taille.

Tableau 7 : Défilement par type de racines et distribution du défilement par diamètres.

Tableau 8 : Défilement par combinaison des types et tailles de racines

Tableau 9 : Comparaison multiple des défilements des combinaisons racines/type/matériau

Tableau 10 : Facteur P en fonction de la combinaison type et taille de racines.

Tableau 11 : Facteur P en fonction du croisement type et de taille des racines et matériau

Tableau 12 : Ratio R des variations de diamètre et diamètre quadratique de l'axe principal par rapport au diamètre des ramifications.

Tableau 13 : Ratio entre le diamètre de l'axe principal et le diamètre des ramifications, et distribution des valeurs.

ARTICLE II

Figure 1 : Localisation des sites d'étude et nombres d'arbres étudiés

Figure 2 : Les deux types de digues, (a) à charge hydraulique permanente, (b) à charge hydraulique temporaire.

Figure 3 : Les quatre types de structure racinaire

Figure 4 : Pourcentage des types de structure racinaire en fonction des matériaux, toutes espèces confondues

Figure 5 : Souches de peuplier, (a) sur matériaux fins à Grenoble, (b) sur matériaux grossiers à Lyon

Figure 6 : Division des racines ligneuses en milliers de radicelles

Figure 7 : Modélisation conceptuelle de la structure des systèmes racinaires ligneux

Tableau 1 : Caractéristiques des sites d'étude

Tableau 2 : Nature, texture et teneur en matières organiques des échantillons de matériaux représentatifs de chaque site d'étude (GS : Grave-Sableuse ; S : Sable ; LS : Limon-sableux)

Tableau 3 : Caractéristiques des deux lasers terrestres utilisés

Tableau 4 : Structure des systèmes racinaires en fonction des espèces végétales et du type de matériaux

Tableau 5 : Caractéristiques de 12 systèmes racinaires numérisés

ARTICLE III

Figure 1 : Système racinaire fasciculé de Robinier, extrait de la digue de Léré.

Figure 2 : Système racinaire mixte de Mélèze, extrait de la digue de Castérino.

Figure 3 : Nombre d'échantillons prélevés et analysés par site prélevés sur les 28 arbres étudiés (20 feuillus et 8 conifères).

Figure 4 : Racine traçante longue d'Érable.

Figure 5 : Quelques types de systèmes racinaires :

- a) racine traçante courte d'Érable ;
- b) racines traçante longue et courte de Pin sylvestre ;
- c) pivot de Pin sylvestre.

Figure 6 : Travaux au laboratoire :

- a) ponçage des échantillons ;
- b) lecture de cernes sous loupe binoculaire.

Figure 7 : Âge des racines en fonction des quatre classes de diamètre et de l'espèce végétale (moyenne+/-1 écart-type).

Figure 8 : Relation âge / diamètre chez les six espèces étudiées.

Figure 9 : Caractéristiques des arbres et racines les plus âgés en fonction des espèces

Figure 10 : Vitesse de croissance chez 3 types de racines chez le peuplier. D : Diamètre (cm) ; A : Age (année) ; ΔD : Croissance en diamètre ; ΔL : Croissance en longueur.

PROJET D'ARTICLE IV

Figure III.Ch4.1 : Image tomographique d'une racine de chêne T0 en section transversale, diamètre 5 cm obtenue par IMAGE J. 126

Figure III.Ch4.2 : Image tomographique d'une racine de chêne T1 en section transversale, diamètre 5 cm obtenue par IMAGE J. 126

Figure III.Ch4.3 : Comparaison des masses volumiques (médianes, max, min) entre les échantillons de bois sain (T0), de bois décomposé (T1) et de souches abattues en 2005 selon les espèces végétales.....126

Figure III.Ch4.4 : Masses volumiques au stade T0 et T1 chez (a) le robinier, (b) le peuplier, (c) le chêne et (d) le frêne (en kg/m³). Les points représentent les valeurs extrêmes, les tirets matérialisent le premier et le neuvième décile, les limites de la boîte sont le premier et troisième quartile, la barre centrale est la médiane, tandis que le point rouge est la moyenne. 128

Figure III.Ch4.5 : Spectres de la sciure de bois des 4 origines variétales au stade T1 (chêne en violet, frêne en rouge, peuplier en vert et robinier en bleu). Les pics correspondent à des éléments chimiques non définis (Absorbance en ordonnée et nombre d'onde en abscisse). 129

Figure III.Ch.4.6 : Différenciation variétale au stade T0 (ACP obtenue à partir des sciures). 129

Figure III.Ch4.7 : Différenciation variétale au stade T1 (ACP obtenue à partir des sciures). 130

Figure III.Ch4.8 : Différenciation entre les stades de décomposition T0 et T1 pour le robinier (ACP obtenue à partir des sciures).....130

Figure III.Ch.4.9 : Différenciation entre les stades de décomposition T0 et T1 pour le frêne (ACP obtenue à partir des sciures) 131

Figure III.Ch4.10 : Différenciation entre les classes de diamètre ($\varnothing$ en cm) pour le chêne au stade T0 et T1 (ACP obtenue à partir des sciures) 131

Figure III.Ch4.11 : Différenciation entre les stades de décomposition T0 et T1 sur le bois interne pour le chêne (ACP obtenue à partir des rondelles de bois) 132

Tableau III.Ch4.1 : Comparaison des masses volumiques obtenues par déplacement d'eau et par tomographie rayons X sur les échantillons de racine de diamètre 2 cm.....127

Tableau III.Ch4.2 : Différences statistiquement significatives entre les espèces pour la masse volumique et la perte en eau au stade T0 et T1 [ex : le groupe (ab) n'est pas statistiquement différent du groupe (a) ni du (b)]......127

Tableau III.Ch4.3 : Caractéristiques du bois des différentes espèces étudiées.....133

ARTICLE V

Figure 1: Some of the large root samples used for the experiments

Figure 2: Example of electrical measurements on two large root samples

Figure 3: Grain size distribution curves of the materials in the six containers

Figure 4: Electrode positions at the soil surface in a container

Figure 5: Three ash samples in longitudinal orientation

Figure 6: One oak sample in transversal orientation

Figure 7: Complex conductivity spectra of four root samples in a frequency range from 22.4 mHz to 750 Hz

Figure 8: Macroscopic wood anatomy for the four species studied. Diffuse distribution of pores for ash and poplar, and ring pores for oak and locust (Schweingruber 1982)

Table 1: Water content, grain size distribution and electrical conductivity of the materials in the containers at 1.46 Hz (G=gravel / S=sand / U=silt)

Table 2: Water content and mean conductivity (with standard error) of root samples of different species

Table: 3 Real and imaginary parts of conductivity at 1.46 Hz of four root samples

Table: 4 Conductivity ratio between measurements with and without buried root samples for both the real part and the imaginary part of conductivity at 1.46 Hz

QUATRIEME PARTIE

Figure IV.1 : Colonisation par des racines d'arbre d'un joint ouvert de perré maçonné - amorces de déstructuration (Levée de la Loire).....157

Figure IV.2 : Colonisation par les racines d'un joint de perré bétonné (Digue de canal du Rhône).....157

Figure IV.3 : Dégradation du perré par colonisation d'une fissure par les racines.....158

Figure IV.4 : Effondrement en crête de digue lié à la décomposition d'une souche (Digue de l'Isère).....158

Figure IV. 5 : Renard hydraulique.....158

Figure IV.6 : Formation d'une brèche (Digue de Camargue) 159

Figure IV.7 : Renversement d'un robinier sur le talus coté rivière (Digue de l'Isère) 159

Figure IV.8 : Affouillement du pied de digue par des courants tourbillonnaires (Digue de l'Isère).....160

Figure IV. 9 : Coupe type et zonage d'une digue de canal (Zanetti et al., 2008) 164

Figure IV.10 : Gestion en îlot des arbres en zone 4 (d'après une pratique CNR) 165

Figure IV.11 : Recharge aval drainante (Digue de Camargue) 168

Figure IV.12 : Réalisation d'une paroi moulée (Digue en Pologne) 168

Tableau IV.1: Synthèse des préconisations de gestion énoncées pour chaque site d'étude..166

ANNEXES

ANNEXE 1

Prospection au Radar géologique sur les digues de protection contre les crues

Déploiement d'un Radar « SEEKER » sur deux sites français : digues de l'Agly et de Camargue

Note technique d'évaluation du Cemagref GR Ouvrages hydrauliques et hydrologie



La présente note formule un avis rapide du Cemagref sur les résultats obtenus lors de campagnes de prospection par le Radar géologique « SEEKER» (US Radar - Sub Surface Imaging Systems) sur des digues du Sud de la France :

- la digue de l'Agly à Saint-Laurent-de-la-Salanque, le 11/04/2007 ;
- deux tronçons de digue de Camargue en aval d'Arles, le 23/01/2008.

A/ Digue de l'Agly : digue rive gauche vers la station d'épuration de Saint-Laurent-de-la-Salanque

Présentation du site :

Cette portion de digue, dont la hauteur est comprise entre 2 m et 2,5 m au dessus du terrain naturel, a connu une brèche par surverse, au droit d'une station d'épuration, lors de la crue de novembre 1999. Cette brèche a été réparée juste après la crue avec des matériaux grossiers compactés 0-20 mm, qui contrastent avec les limons ou limons sableux du corps de digue et de la fondation. D'après un relevé topographique effectué après le sinistre, ses dimensions initiales étaient de 39,5 m d'ouverture en « gueule » (crête de digue) pour 4,4 m de profondeur maximale : toutefois, dans le cadre du chantier de comblement, la paroi amont (vers l'ouest) de la brèche a été reprofilée afin de constituer une rampe d'accès à pente douce pour les engins de terrassement. La zone de réparation s'étend donc sur 80 m environ dans le sens longitudinal de la digue.

En aval de cette brèche et toujours lors de la même crue de 1999, plusieurs surverses se sont produites, érodant plus ou moins gravement le talus côté val de la digue. Les niches d'érosion en résultant – dont certaines avaient régressé jusque vers le milieu de la crête – ont elles aussi été réparées par remblaiement avec du matériau 0-20 mm compacté. Ces zones de réparation constituent donc aujourd'hui autant d'hétérogénéités dans le sens transversal de la digue que des profils géophysiques conduits en parallèle, côté val et côté fleuve de la crête, sont susceptibles de mettre en évidence.

Du fait de ses particularités de constitution, ce tronçon de digue est utilisé depuis l'année 2000 par le Cemagref, et ses divers partenaires, pour expérimenter et tester différents matériels de prospection géophysique ou géotechnique, dont les premières dans le cadre du projet national CRITERRE.

Conditions du test :

- Réalisation le 11 avril 2007 matin, en présence du Cemagref (MM. Arnaud et Mériaux, Mlle Zanetti).
- Doublement¹ du repérage métrique par l'intermédiaire d'un Topofil déployé par le Cemagref.
- Avec l'antenne de 250 MHz :
 - départ depuis le point métrique 0 (PM) de référence pour un profil sur le bord côté fleuve de la chaussée goudronnée ;
 - demi-tour au point PM 1400 (Topofil) pour un profil cette fois-ci côté val de la chaussée ;

¹ Le repérage de base du radar Seeker se fait par réinitialisation des profils tous les 400 m. Pas de GPS embarqué pour ce test.

- puis retour à la zone de brèche réparée (PM 400- 600), avec double passage : le premier côté val, le second côté fleuve.
- Avec l'antenne de 500 MHz :
 - plusieurs passages côté fleuve de la chaussée de crête, vers le PM 500, pour tenter de repérer la conduite d'eau usée (en fonte, diamètre de 600 mm à son débouché aval) en fondation de la digue, qui débouche au PM 482 dans la berge du fleuve.

Commentaires Cemagref sur les résultats :

In situ :

- le système de repérage de base de l'appareil (« remise à zéro » tous les 400 m) n'est pas d'interprétation conviviale ;
- par contre, le retour en temps réel du radargramme sur l'écran vidéo embarqué constitue indéniablement un point fort de l'appareil, permettant de localiser immédiatement les grosses anomalies en vue de passages affinés ultérieurs ;
- sur les zones d'hétérogénéités transversales liées au remblaiement d'érosions par surverse, par exemple autour du PM 1400, l'examen du radargramme temps réel a permis de relever immédiatement la singularité du profil longitudinal en crête côté val par rapport au profil parallèle côté fleuve.

Radargrammes et rapport :

- il existe un décalage entre le repérage recalé du Radar Seeker et les indications du Topofil. Cet inconvénient devrait disparaître avec l'utilisation d'un GPS embarqué ;
- les zones d'anomalies résistantes (remblaiement de brèches ou d'érosions, avec du matériau grossier 0-20 mm) qui s'étendent jusque sous la couche de chaussée (elle aussi résistante) sont très nettement révélées par le radargramme. Leur extension géométrique (le long de la digue et en profondeur) semble correcte, pour autant que l'on puisse en juger ;
- les radargrammes n'ont pas pu être facilement exploités car nous n'en disposons que d'enregistrements vidéo. Un logiciel de traitement doit probablement exister pour déterminer et afficher à la demande des fenêtres de mesures ;
- une comparaison très sommaire () avec le radargramme issu d'une campagne de mesures faite en 2001 par le LRPC avec un radar SIR-10A+ (antenne de 500 MHz) montre que la zone de réparation de brèche est révélée avec plus de détails par l'intermédiaire du radar Seeker. La profondeur maximale de l'anomalie est cohérente avec la réalité (4 m) et on retrouve la dissymétrie de la réparation due à la rampe d'accès créée côté ouest au cours du chantier ;
- enfin, sur les deux tracés, en aval de la brèche, on remarque la monotonie du signal radar au-delà de 1 m de profondeur, ce qui résulte de la probable absorption des ondes radar par les matériaux limoneux conducteurs du corps de digue intact.
- Du coup, on ne parle pas de la non détection de la conduite en fonte de diamètre 600 mm situé au PM 500 à 5/6 m de profondeur ? (avec l'antenne 250 MHz) cela prouve que c'est bien que le signal qui est absorbé et non pas qu'il n'y a rien à voir...

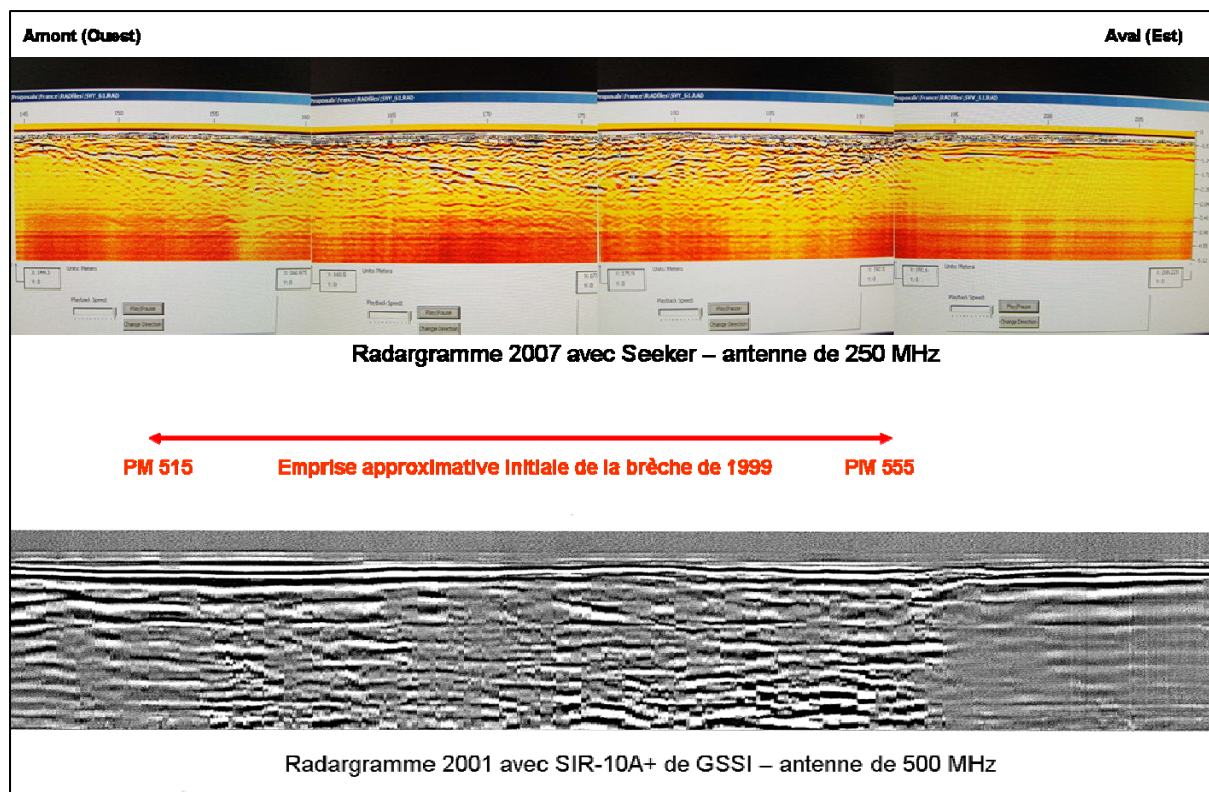


Figure A.1 : Radargrammes comparés de la brèche réparée de St Laurent-de-la-Salanque (profil sur chaussée de crête, côté fleuve)

B/ Digues de Camargue : digue rive gauche du Petit-Rhône dans le secteur de Cazeneuve

Présentation du site :

- Présence de conduite traversante au niveau de la prise d'eau du Mas de Cazeneuve : secteur de fuite au niveau du passage de la canalisation
- Présence d'arbres sur le talus côté fleuve : systèmes racinaires dans le corps de digue (chênes et peupliers blancs plus ou moins éparés sur le talus côté fleuve, certains étant implantés à 1 m du bord de la crête) ;

Conditions du test :

- Réalisation le 23 janvier en fin de matinée, en présence du Cemagref (M Mériaux et Mlle Zanetti).et du SYMADREM (M Ramon).
- Doublement du repérage métrique par l'intermédiaire d'un Topofil déployé par le Cemagref.
- Réalisation de profil en long, en crête, vers l'axe de la digue, sur 515 m : recherche de la conduite traversante au niveau de la prise d'eau du Mas de Cazeneuve (avec l'antenne de 250 MHz) :
 - PM 0 : RAS, sur digue confortée en 1998 (crête large) ;
 - PM 33 m : barrière d'interdiction en crête ;
 - PM 47 m : axe du passage traversant (PM 51 côté fleuve), ouvrage de prise profond refait en 2005 ;
 - PM 125 m : jonction avec digue ancienne (crête étroite), avec recharge drainante côté val réalisée au printemps 1994 ;
 - PM 287 m : premier arbre visible sur le talus côté fleuve ;
 - PM 315 m : arbre sur le talus côté fleuve ;

- PM 372 m : premier arbre visible sur le talus côté fleuve, après le coude de la digue ;
 - PM 387 m : arbre en pied, côté val ;
 - PM 475 m : gros peuplier sur le talus côté fleuve, avec racines apparentes et saillantes en crête ;
 - PM 515 m : fin de profil, au-delà d'un bouquet d'arbres sur le talus côté fleuve.
- Réalisation de profil en travers (avec l'antenne de 500 MHz) :
- PM 287 à 515 : passages autour 5 arbres marqués sur le talus coté fleuve

Commentaires Cemagref sur les résultats :

- non détection de la conduite traversante en profondeur
- interprétation complexe et nombreux échos au droit du passage des arbres

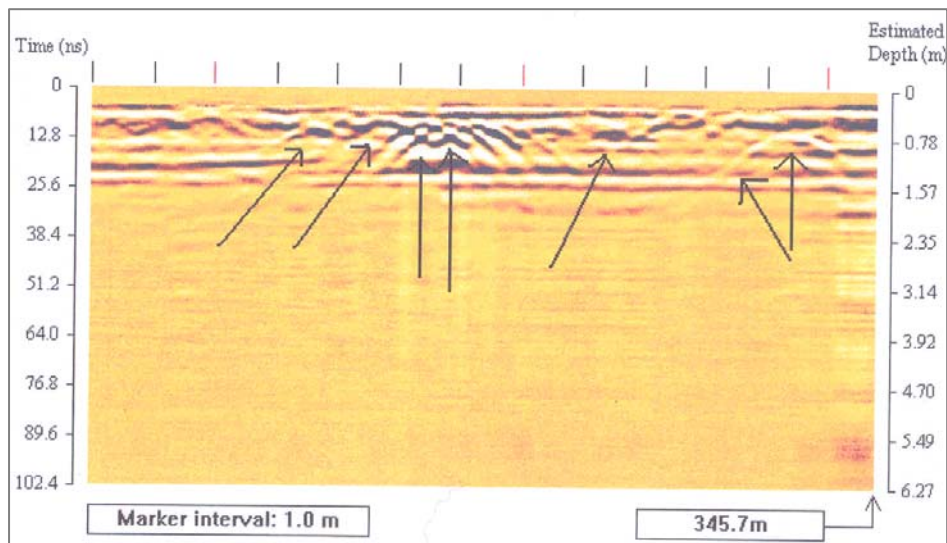


Figure 2 : Antenne 250 MHz, passage en crête de digue
(les flèches verticales indiquent la présence d'une poche d'air sous les racines)

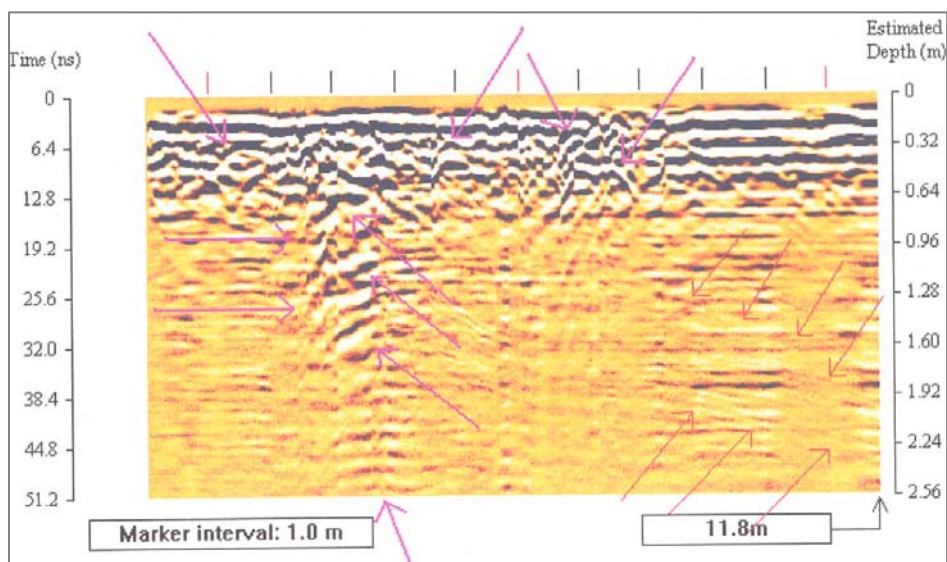


Figure 3 : Antenne 500 MHz, passage autour des arbres
(les flèches roses indiquent la présence de racines, les flèches rouges indiquent la stratigraphie, limites entre les couches de terre)

C/ Conclusions du Cemagref

Avant les interventions objets de la présente note, le Radar géologique a déjà été utilisé, à maintes reprises, à titre exploratoire ou de façon opérationnelle, sur les digues françaises de protection contre les inondations. Les premières utilisations remontent à une quinzaine d'années.

Un premier retour d'expérience a été effectué dans les publications résultant du Projet National français CRITERRE.

Les sites investigués par le Radar SEEKER en 2007 et 2008 avaient déjà fait l'objet de prospection Radar dans les années antérieures, c'est d'ailleurs en partie ce qui avait justifié la sélection de ces sites.

Le Radar SEEKER a présenté des performances équivalentes à celles de ses prédécesseurs, avec l'avantage indéniable d'un retour en temps réel des images. Ce qui permet un gain de temps non négligeable et une augmentation de la précision du relevé par repérage instantané des irrégularités permettant de multiplier les passages à la demande.

Les anomalies résistantes (matériaux de comblement de la brèche et des zones de surverse de la crue) remontant jusqu'à la surface et situées dans un encaissant conducteur, sont très bien repérées.

L'absorption des ondes radar par les matériaux limoneux conducteurs ne permettent pas de détecter les irrégularités (conduites ou racines) situées à plus de 70 cm de profondeur. La présence de matériaux grossiers (blocs et galets) génère de nombreux échos, brouillant les signaux sur le radargramme.

Dans le cadre de la détection des racines, le Radar est une méthode peu fiable qui présente d'importantes difficultés d'interprétation (lecture des radargrammes).

ANNEXE 2

Spectral induced polarization spectra of root wood samples

We sent at Clausthal University, 16 root wood pieces of poplar, black locust, oak and ash for investigating IP spectra. Three cylindrical samples (length approx. 40 mm, diameter approx. 20 mm) have been prepared for each type of wood. The first and the second cylinder were placed in the sampleholder immediately after preparation to prevent drying. The third sample of each type of wood was kept in a locked glass for a few days until the measurements start. All samples were cut out of the wood pieces in axial direction, i.e. in the direction of water and nutrient flow within the wood.

The amplitude and the phase angle of the complex resistivity have been investigated with a SIP-Fuchs equipment (by Radic-Research, Berlin) in the frequency range between 2.8 mHz and 750 Hz. The first measurement was done one day after preparing the measuring cell. Two additional measurements were carried out in the following five days in order to control temporal variations.

The measured phase curves are similar for most samples. Only the samples that have not been put in the sampleholder immediately after extraction show a different phase curve combined with a higher resistivity amplitude. This effect can be ascribed to the drying process of the wood samples before putting them into the sampleholder. The affected spectra were not regarded for further analysis.

Although all considered IP spectra exhibit some variations in the phase curves a relatively large local phase maximum at a common frequency is observed. Statistical analysis yields a mean frequency of 0.88 Hz (standard deviation: 0.40 Hz) for the local phase maximum regarding all wood samples. Differentiating between the wood types yields the following mean phase maximum frequencies:

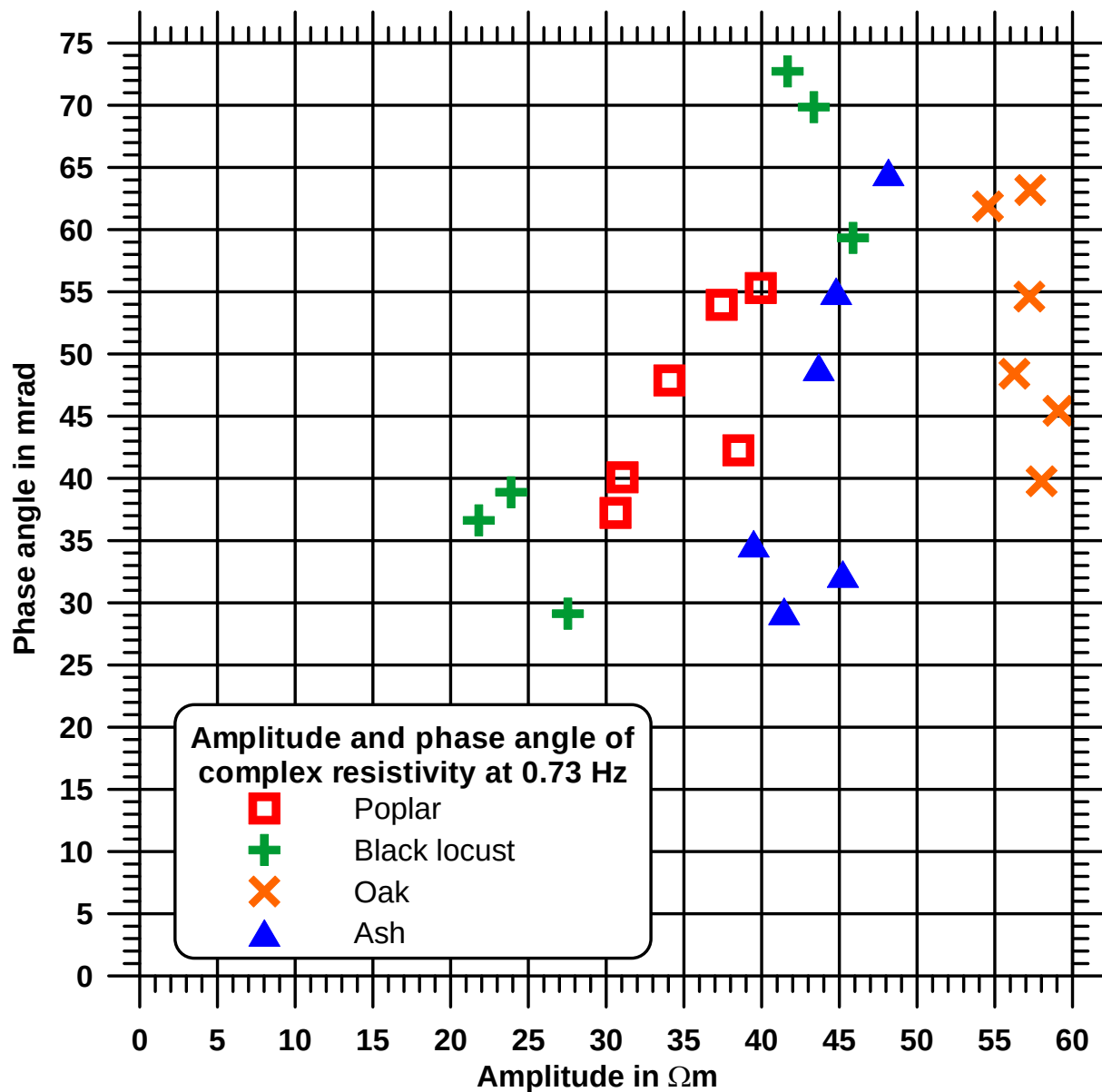
Frequency of the phase maximum	poplar	black locust	oak	ash
mean value (Hz)	0.61	0.73	0.85	1.34
standard deviation (Hz)	0.19	0.40	0.30	0.30

Because the frequency of 0.88 Hz cannot be investigated with the SIP-Fuchs equipment, we compiled the data measured at 0.73 Hz in the table below. The phase angles acquired at this frequency were between 29 mrad and 73 mrad, whereas the largest value was observed for IP spectra of black locust. The amplitude varies between 22 Ωm and 59 Ωm .

Complex resistivity at 0.73 Hz	poplar	black locust	oak	ash
amplitude (Ωm)	31 - 40	22 - 46	55 - 59	39 - 48
phase angle (mrad)	37 - 55	29 - 73	40 - 63	29 - 65

The observed phase maxima at about 0.88 Hz are promising. For explicit statements about the applicability of SIP for detecting roots in a saturated subsoil, laboratory investigations of the relevant soil and in situ tests are necessary. Regarding the recent results and previous

investigations concerning covered plankways in peatlands (Weller et al., 2006), SIP may be a useful tool for detecting wooden structures in the shallow subsurface.



Cross-plot of the phase angle versus amplitude of complex resistivity at 0.73 Hz. Differences between the types of wood are recognizable for the amplitude. A significant phase angle can be observed for all samples.

Reference:

Weller, A., Nordsiek, S. and Bauerochse, A. (2006): Spectral Induced Polarization – a Geophysical Method for Archeological Prospection in Peatlands. *Journal of Wetland Archaeology*, 6, 2006, 105-125.

RESUME

La plupart des pays du globe disposent d'un parc important d'ouvrages hydrauliques en remblai (digues et barrages), souvent anciens et supportant une végétation arborescente parfois dense. De nombreuses ruptures ou défaillances d'ouvrages, au cours de ces trois dernières décennies, ont justifié un regain d'études et, en France, un renforcement des réglementations en matière de sécurité des ouvrages hydrauliques. Le retour d'expérience des gestionnaires a mis en évidence que la présence des arbres sur les digues et les barrages en remblai génère des risques d'érosion susceptibles de conduire à leur rupture. L'ensemble des travaux et des analyses développés dans cette thèse ont donc pour but d'améliorer nos connaissances sur l'enracinement des arbres dans les ouvrages hydrauliques en terre et d'évaluer les aléas associés. Pour cela, nous avons adopté différentes échelles d'observations spatiales et temporelles et réalisé une dizaine de chantiers expérimentaux où quelques 186 arbres ont été dessouchés avec précaution. Nous avons étudié les caractéristiques des systèmes racinaires vivants – à l'échelle de la souche, de la racine et du cerne de croissance annuel – et analysé le phénomène de décomposition des racines après abattage des arbres. Nous avons également recherché et évalué une technique permettant la détection des racines ligneuses afin de localiser celles potentiellement dangereuses pour l'ouvrage. La synthèse des observations et des résultats a permis de caractériser les impacts potentiels des enracinements d'essences ligneuses sur la sécurité des ouvrages. La dimension de la partie aérienne de l'arbre (prise au vent – effet de levier) et la structure des enracinements (résistance à l'arrachement) influencent le risque d'érosion externe, tandis que l'architecture des racines (type, dimension et direction), leur état de décomposition (formation de galeries) ainsi que les propriétés des matériaux (aptitude à conserver les galeries) influencent le risque d'érosion interne. Un premier recueil de préconisations générales de gestion de la végétation applicables aux digues et barrages boisés est établi.

Mots clef : Système racinaire d'arbre, architecture, croissance, décomposition, détection, sécurité des ouvrages, ouvrages hydrauliques en remblai.

ABSTRACT

Most countries in the world have an important park of hydraulic structures (dikes and dams), often dated, and sometimes supporting dense woody vegetation. Numerous breaks or failures, during the last three decades, have justified extra studies and, in France, have led to a reinforcement of the regulations regarding hydraulic structures safety. Feed-back from managers has highlighted that trees growing on dikes and dams increase erosion risks leading to potential breaks. The work and the analyses of this thesis are aiming at improving our knowledge about the impact of rooted trees on embankments and at estimating the associated risks. For that purpose, we adopted various scales of spatial and temporal observations and realized about ten experimental investigations on site where some 186 trees were excavated with precaution. We studied the characteristics of live root systems – at stump scale, root scale and annual ring of growth - and we analyzed the phenomenon of root decomposition after the trees were cut down. We have also searched and assessed a technique allowing the detection of woody roots to find those potentially dangerous for the dikes. The synthesis of the observations and the results has allowed to define the characteristics of the potential impacts of the woody root systems on the dikes safety. The size of the tree above the ground (wind effect - leverage) and the structure of the root system (uprooting resistance) influence the external risk of erosion, whereas root architecture (type, dimension and direction), their decomposition state (formation of galleries) as well as material properties (keeping galleries) influence the risk of internal erosion. A first collection of general recommendations of the vegetation's management applicable to dikes and wooded dams is established.

Key words: Tree root system, architecture, growth, decay, detection, dike safety, earth embankment.