



HAL
open science

Développement de l'imagerie des systèmes racinaires dans les ouvrages hydrauliques en remblai par tomographie électrique et acoustique

B. Mary

► **To cite this version:**

B. Mary. Développement de l'imagerie des systèmes racinaires dans les ouvrages hydrauliques en remblai par tomographie électrique et acoustique. Sciences de l'environnement. 2015. Français. NNT : 2015AIXM4386 . tel-02602534

HAL Id: tel-02602534

<https://hal.inrae.fr/tel-02602534>

Submitted on 16 May 2020

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

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

École doctorale 251 : Sciences de l'environnement

Spécialité Géosciences de l'Environnement

THESE

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université d'Aix-Marseille

Sujet de la thèse :

Développement de l'imagerie des systèmes racinaires dans les ouvrages hydrauliques en remblai par tomographie électrique et acoustique

Présentée par

Benjamin MARY

Soutenue publiquement le :

16 Décembre 2015

devant le jury composé de :

M. Loic BRANCHERIAU	Chargé de recherche, CIRAD	Rapporteur
M. Christian CAMERLYNCK	Maître de conférence, UPMC, Paris	Examineur
M. Nicolas FLORSCH	Professeur des universités, UPMC, Paris	Rapporteur
Mme. Laurence JOUNIAUX	Directrice de recherche, CNRS-IPGS	Examineur
M. Philippe LASAYGUES	Ingénieur de recherche, LMA-CNRS	Examineur
M. Laurent PEYRAS	Ingénieur des Ponts HDR, IRSTEA	Co-Directeur de thèse
Mme. Ginette SARACCO	Directrice de recherche, CNRS-CEREGE	Directeur de thèse
M. Michel VENNETIER	Ingénieur IRSTEA	Encadrant scientifique

Avant-propos

Cette thèse est une contribution au **Labex OT-Med**¹ financé par le programme de l'Agence Nationale de la Recherche Française à travers le projet A*MIDEX, élaboré par l'université d'Aix-Marseille et ses partenaires en réponse à l'appel à projets "Initiatives d'Excellence" (Idex) du programme **Investissements d'Avenir**.

La recherche d'OT-Med est axée sur le changement climatique et les risques naturels dans le bassin méditerranéen et a notamment pour objectif d'identifier et évaluer des stratégies novatrices pour aider les décideurs à élaborer des politiques publiques et les entreprises dans le traitement des questions environnementales.

Ce projet est coordonné par Joël Guiot que je remercie tout particulièrement de m'avoir encouragé, soutenu, et fait confiance au cours de cette thèse.

D'autre part, cette thèse est également une contribution d'IRSTEA, financée par l'unité de recherche RECOVER. L'unité de recherche RECOVER produit des connaissances nouvelles dans le domaine des risques environnementaux et les écosystèmes. Son équipe Géomécanique Génie Civil Décision Risque développe des compétences dans le champ disciplinaire des sciences pour l'ingénieur et la problématique des ouvrages hydrauliques.

1. (N°ANR-11-LABX-0061)

Remerciements

La vie, c'est comme une bicyclette, il faut avancer pour ne pas perdre l'équilibre

Albert Einstein

Tout d'abord ce sont mes parents qui m'ont donné l'envie d'apprendre et d'aller au bout des choses. Mon parcours je le dois aussi à mon frangin que j'ai suivi un bon bout de temps en voulant "moi-aussi" tout faire comme lui. D'une façon générale ma famille a toujours été d'un grand soutien (tata cat' et ses sœurs m'ayant jeté dans le grand bain de la recherche).

En regardant en arrière, au cours de ces trois années de thèse, la liste des "personnes sans qui" ce travail n'aurait pas pu être possible s'est largement agrandie. En voici un aperçu.

Si le cours d'eau change d'itinéraire, le caïman est obligé de le suivre.

Proverbe Burkinabé

Mes remerciements s'adressent en premier lieu à ma directrice de thèse Ginette Saracco qui m'a rassuré et encouragé sur mes initiatives ainsi qu'à mon co-directeur Laurent Peyras qui m'a donné ma chance, fait confiance et su me mettre dans des conditions idéales pour mener à bien ce travail au sein du centre IRSTEA d'Aix-en-Provence. J'ai apprécié le travail aux côtés de mes encadrants toujours la porte grande ouverte : Michel Vennetier avec qui nous avons eu de nombreux échanges scientifiques enrichissants et pour sa présence sur le terrain ; Patrice Mériaux pour son aide précieuse concernant les démarches complexes (mise en place du dispositif expérimental) ainsi que pour ses recherches bibliographiques historiques.

Je voudrais enfin remercier Nicolas Florsch et Loic Brancheriau de m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de ma thèse, ainsi que Laurence Jouniaux présidente du jury, Christian Camerlynck et Philippe Lasaygue (examineurs) pour l'engouement qu'ils ont témoigné à ce sujet.

Je suis abasourdi par le nombre de personnes qui veulent "connaître" l'univers alors qu'il est déjà suffisamment difficile de se repérer dans le quartier chinois de New York.

Woody Allen

De par la pluridisciplinarité de ce sujet, j'ai eu la chance de croiser de nombreuses personnes que je tiens à remercier. Tout a commencé avec Cyrille Balland mon tuteur de stage avec qui j'ai partagé de bons moments et qui a soutenu ma candidature au démarrage de cette thèse. A Sergio Palma-Lopes de l'IFSTTAR pour son écoute et pour sa relecture bien avisée de la partie applicative des méthodes géophysiques aux ouvrages hydrauliques. Merci aux chercheurs, doctorants et post-doc de METIS de m'avoir accueilli, Ameen, Sylvain et aussi à Feras pour son aide précieuse et Thomas de L'IPGP pour la conception des électrodes. Enfin merci aux personnes que j'ai rencontrées en colloque pour leurs retours et échanges constructifs.

Merci à mes collègues et amis CEREGIEN, Lise, Sophie, Lucie ainsi que Nico de m'avoir fait une petite place dans leurs bureaux lors de mes passages impromptus.

La thèse c'est aussi des moments de décompressions comme lors des summers school à Montpellier ou en Estonie aux côtés d'Olivier et Alena ainsi que de l'équipe d'enseignants. Un

remerciement particulier à Ilja Reiter de m'avoir donné la possibilité, par la suite de travailler en collaboration sur le site de l'OHP (Observatoire de Haute Provence) et pour le bon moment de convivialité qui a suivi la rude journée d'acquisition.

J'ai rencontré aussi du beau monde lors des journées d'Ot-Med : l'équipe de doctorants et post-doc d'OT-Med, Simon, Guillaume, Camille, Nela, qui au fil des années s'est bien agrandie. Je retiens aussi de très bons moments au cours des journées de la fête de la Science avec Katia et Chloé.

Enfin il y a des acteurs de ce travail moins exposés et qui pourtant doivent figurer dans ces remerciements : Je remercie (sans ordre) l'AD Isere Drac Romanche (Gomez) qui nous a permis d'extraire des arbres sur leurs digues, Caroline Zanetti pour avoir contribué à la mise en place et à la collecte des échantillons ; frerot Bambara de nous avoir accompagné sur le terrain. La pépinière d'Aix pour leur participation à la plantation des petits Peupliers support de nos études ; Les membres du labo "meca-sol" pour leur aide ; L'équipe informatique de m'avoir fait confiance en me donnant les droits au bout de 2ans de thèse. Merci à Sébastien Merckle de m'avoir donné l'opportunité de venir faire un peu de terrain.

Le bonheur n'est réel que lorsqu'il est partagé.

Into the wild, Chris.

Je n'oublie pas Chfab, Nabgha, Djib', Sim', Gigi, Laeti, Antho et toutes ses ex, mes collègues de bureaux (open space, cave ou encore bunker) qui bien au-delà des relations professionnelles sont devenus de vrais complices ! Merci à eux de m'avoir soutenu dans les moments difficiles, d'avoir organisé des vrais moments de convivialité, que ce soit les sorties escalades dans la Sainte Victoire ou les vendredi pétanques. Bonne chance aux futurs doctorants de l'open space.

Big up à tous mes amis d'Aix, les sportifs Jo', Flo' pour les tennis, les danseurs et fêtards, Po', Juju', les randonneurs Mat', Bertrand et Anaik, les gastronomes, David pour le bon vin, Remi et Yoann pour leur sympathie. Que de bons moments à vos côtés !

Même si je ne les cites pas, merci aux personnes que j'ai pu croiser de près ou de loin et qui m'ont apporté tous les ingrédients nécessaires pour m'épanouir au cours de ces trois années.

L'avenir contient de grandes occasions. Il révèle aussi des pièges. Le problème sera d'éviter les pièges, de saisir les occasions et de rentrer chez soi pour six heures.

Woody Allen

L'avenir je l'imagine aux côtés de tous ceux précédemment cités et auprès d'autres belles rencontres comme celle de ma chère et tendre madrilène Ana :).

Résumé

La végétation arborée sur les digues ou les barrages en remblai est un facteur de fragilité pouvant favoriser l'apparition de mécanismes de détérioration par érosion. Définir la structure géométrique des systèmes racinaires, leurs positions (profondeur, extension) dans le remblai, ainsi que la nature des sols dans lesquels ils croissent est nécessaire afin d'appréhender les conséquences de leur développement sur la sécurité d'un ouvrage hydraulique. Les méthodes géophysiques non-destructives sont utilisées pour l'exploration, la détection et la tomographie 3D du sol. Toutefois, la localisation des racines dans un remblai d'ouvrage hydraulique n'est pas triviale, les systèmes racinaires étant complexes et très diversifiés et la nature de la constitution des ouvrages hydrauliques en terre étant rarement connue et homogène. Ces méthodes doivent être adaptées et améliorées pour détecter et localiser les racines ligneuses dans ces conditions spécifiques.

Des expériences en laboratoire ont d'abord permis de déterminer les propriétés acoustiques et électriques intrinsèques d'échantillons racinaires menant à l'identification de signatures indispensables à la discrimination de l'anomalie liée à la racine sur le terrain. Le montage de supports expérimentaux adaptés nous a conduit à progressivement étudier des paramètres d'influences (masse racinaire, teneur en eau...) en conditions contrôlées.

Des essais en conditions semi-contrôlées sur un dispositif d'arbres plantés dans un sol limoneux homogène ont permis d'évaluer la pertinence des différentes méthodologies d'acquisition, tels que l'utilisation de la polarisation provoquée temporelle en tomographie de résistivité complexe ou encore la géométrie des capteurs pour la tomographie acoustique. Au-delà de la validation des acquis bibliographiques, des traitements innovants tels que l'analyse en ondelettes sont associés afin d'exploiter la richesse des enregistrements. Les résultats obtenus ont été validés par le relevé des positions réelles des racines. Malgré certaines limites, la tomographie de résistivité électrique offre une corrélation satisfaisante avec la localisation des anomalies dues aux racines.

Enfin, des campagnes d'auscultation sur un ouvrage réel ont été réalisées et ont permis de mettre en évidence une variabilité spatiale du corps de digue associée à la présence d'arbres. Une méthodologie adaptée au diagnostic géophysique de la végétation sur les ouvrages a été mise en place. Celle-ci révèle que la cohérence des résultats gagne à prendre en compte, pour chaque étape de l'étude, de la stratégie d'acquisition, du traitement et de l'interprétation, une mutualisation à la fois de la connaissance experte, mais aussi le couplage multiméthodes.

Mots clés : Ouvrages hydrauliques, Végétation arborée, Systèmes racinaires, Tomographie de résistivité complexe, Polarisation provoquée, Tomographie acoustique.

Abstract

Woody vegetation from earth dikes or dams is a fragility factor which can promote mechanisms of degradation such as erosion. An accurate assessment of root system structure, of root position into the embankment (depth, extension), and a good knowledge of soil conditions are critical in order to anticipate the consequences of vegetation development for the hydraulic structure's safety. Geophysical non-destructive methods are used for soil exploration and 3D imaging by tomography . However, locating roots in earth embankments is not a trivial issue since roots systems are complex and diversified, and the constitution of hydraulic embankments are rarely known nor homogeneous. Thus, geophysical methods must be adapted and improved to detect and locate woody roots in specific conditions.

Laboratory experiments allowed determining intrinsic acoustical and electrical root properties leading to identify relevant signatures and discriminate anomalies related to roots in the field. The establishment of adapted experimental devices led us progressively to assess different parameters (roots mass, water content. . .) under controlled conditions.

Experiments in semi-controlled conditions with trees planted into a homogenous loamy soil, were conducted to assess the relevance of different methodologies, such as the use of temporal induced polarization in complex resistivity tomography or the geometry of sensors for acoustical tomography. Beyond the validation of bibliographic references, innovative data processing such as wavelet analysis were used to valorize the rich database. The results were validated by the determination of actual root position. Despite of some limits, the electrical resistivity tomography offers an adequate correlation with the location of root induced anomalies .

Finally, field investigations into an embankment have been performed to highlight a spatial variability of dike structures associated with trees presence. A methodology adapted to the geophysical diagnostic of vegetation roots in embankments was developed. The coherence of the results improves for each step of the study from the acquisition strategy to data processing and result interpretation when expert's knowledge is considered together with a multimethod approach.

Key words : Embankment hydraulic structures, Electrical tomography, Acoustical prospecting, Root detection

Key words : Embankment hydraulic structures, Electrical tomography, Acoustical prospecting, Root detection

Table des matières

Avant propos	i
Résumé	iv
Abstract	v
Introduction	1
Les ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la croissance de végétation arborée : du constat d'une situation à l'expression d'un besoin de diagnostic géophysique	5
1 Contexte	5
1.1 Ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la croissance de végétation arborée : identification, fonctions et constitution	5
1.2 Risques associés à la végétation présente sur les ouvrages hydrauliques	7
1.2.a Les mécanismes d'érosion associés à la végétation	8
1.2.b Facteurs d'influence de l'érosion	9
1.3 Observation du développement des zones racinaires	12
1.3.a Pratiques actuelles : utilisation de méthodes destructives ou de modélisation	12
1.3.b Plasticité des structures racinaires	12
1.3.c Informations "a priori" pour les méthodes géophysiques	15
Synthèse du chapitre	15
2 Application des méthodes géophysiques à l'étude des systèmes racinaires	16
2.1 Objectifs et adaptation d'une stratégie de prospection	16
2.1.a Objectifs de la mise en place de la géophysique	16
2.1.b Méthodologie générale d'un diagnostic de digue	17
2.1.c Choix de la méthode de prospection	20
2.2 Les méthodes géoélectriques	23
2.2.a Activités bio-électriques et polarisation spontanée des systèmes racinaires	23
2.2.b La tomographie de résistivité électrique	26
2.2.c La polarisation provoquée	33
2.2.d Méthodes d'inversions des données électriques	49
2.2.e Synthèse des méthodes géoélectriques pour la détection de racines et voies d'améliorations possibles	51
2.3 Les méthodes acoustiques	53
2.3.a Rappels sur la propagation des ondes acoustiques	53
2.3.b Stratégie d'acquisition	62
2.3.c Traitement et analyse des données acoustiques	65
2.3.d Synthèse des méthodes acoustiques pour la détection de racines et voies d'améliorations possibles	69
Synthèse du chapitre	71

3	Objectifs et propositions	72
3.1	Les questions scientifiques de la thèse	72
3.2	Objectifs	73
3.3	Méthodologie adoptée au cours de la thèse	73
 Étude expérimentale au laboratoire et en condition semi-contrôlées		75
4	Supports expérimentaux	76
4.1	Collecte d'échantillons racinaires	76
4.2	Construction d'un dispositif expérimental d'étude d'arbres en place	78
5	Imagerie acoustique	83
5.1	Introduction	83
5.2	Étude des propriétés acoustiques en laboratoire	84
5.2.a	Mesures en transmission d'échantillons	84
5.2.b	Résultats et interprétation	88
5.2.c	Mesure en tomographie	93
5.2.d	Résultats et interprétation	95
5.3	Tomographie acoustique de type sol/tronc	104
5.3.a	Introduction	104
5.3.b	Méthodologie expérimentale	107
5.3.c	Validation de la méthodologie de tomographie sol/tronc	109
5.3.d	Comparaison des résultats avec la position réelle des racines	116
5.4	Conclusions, limites et perspectives	122
6	Imagerie géoélectrique	125
6.1	Mise en évidence d'effets de polarisation sur des échantillons racinaires	126
6.1.a	Introduction	126
6.1.b	Matériel et méthodes	128
6.1.c	Résultats et interprétation	133
6.2	Influence de la masse racinaire	137
6.2.a	Résultats	137
6.2.b	Cartographie in-situ	141
6.2.c	Conclusion sur l'influence de la fréquence d'injection et de la masse racinaire sur le potentiel de détection	145
6.3	Suivi géoélectrique de l'évolution temporelle en fonction de la teneur en eau du sol	147
6.3.a	Introduction	147
6.3.b	Matériel et méthodes	147
6.3.c	Résultats et discussions	151
6.3.d	Conclusion et perspectives	158
6.4	Conclusions, limites et perspectives	159
 Application et valorisation : expérimentations en conditions réelles		162
7	Application aux digues d'Arles	162
7.1	Introduction	162
7.1.a	Objectifs	162
7.1.b	Plan de l'étude	163
7.2	Présentation des sites d'études	163

7.2.a	Site 1 : rive gauche du Petit Rhône - Mas Beaumont	164
7.2.b	Site 2 : rive droite du Grand Rhône - Beaujeu	167
7.3	Matériel et méthode	168
7.3.a	Instrumentation	168
7.3.b	Stratégie de prospection	170
7.3.c	Préparation in-situ	174
7.4	Traitement et interprétation des données	175
7.4.a	Méthode électrique	175
7.4.b	Méthode acoustique	176
7.5	Résultats et discussions	178
7.5.a	Petit Rhône rive gauche	178
7.5.b	Grand Rhône rive droite	199
7.6	Conclusions et limites de l'application des méthodes de tomographies aux digues	203
Conclusion et perspectives		207
	Bilan et apports des travaux réalisés	207
	Perspectives	211
Bibliographie		214
Table des figures		227
Table des figures		227
Liste des tableaux		235
Liste des tableaux		235

Introduction

Contexte de la gestion du risque d'inondation associé à la végétation sur les ouvrages hydrauliques

Le risque inondation et la sécurité des ouvrages hydrauliques

Les ouvrages hydrauliques tels que les digues et les barrages présentent une vulnérabilité particulière, liée au vieillissement naturel, aux éventuels problèmes de conception – réalisation, à la maintenance ou encore aux évènements extérieurs (crues, séismes, erreurs d'opération) qui accroissent leurs sensibilités. Malgré une réglementation² qui oblige les gestionnaires à prendre en compte et remédier aux scénarios de rupture possibles, on observe régulièrement des défaillances et des ruptures. Les causes de dégradation et rupture les plus fréquentes sont liées aux phénomènes d'érosion, en particulier le phénomène d'érosion interne défini comme l'entraînement progressif des particules constituant l'ouvrage sous l'action de l'écoulement qui le traverse (Foster et al., 2000).

Les inondations de la Nouvelle Orléans aux USA lors de l'ouragan Katrina en 2005, dans l'Ouest de la France au cours de la tempête Xynthia en 2010 ou encore en 1993, 1994, 2002 et 2003 en Camargue comptent parmi les événements ayant eu des conséquences dramatiques. Au cours de ces dernières années consécutivement à ces événements catastrophiques, des programmes de recherche ont été conduits, afin d'améliorer les pratiques de gestion et les lacunes techniques et scientifiques. Ainsi, le programme international ILH³ et européen FloodProbe⁴ apportent des éléments de réponses sur les bonnes pratiques à adopter de façon générale pour le contrôle des digues.

Ces questions sont importantes en méditerranée et plus spécifiquement en région PACA, où l'enjeu est élevé car de nombreuses villes abritent de fortes densités de population et sont situées à proximité de côtes ou de grands fleuves. Le croisement de forts enjeux et d'aléas de niveaux rares induit un fort risque d'inondation dans cette région.

Les phénomènes d'érosion associés à la présence de végétation arborée

Le programme national ERINOH⁵ a pour objet l'étude des phénomènes mécaniques qui contrôlent le déclenchement et l'évolution des mécanismes de rupture par érosion interne. Il introduit les premiers éléments d'évaluation par des méthodes géophysiques.

La végétation sur les digues est un maillon de la biodiversité que constituent les milliers de kilomètres de digues existantes. Il convient d'avoir une gestion raisonnée de la végétation sur ces ouvrages. Celle-ci commence par une bonne connaissance de l'impact de la végétation sur la stabilité des ouvrages. La problématique de la présence de la végétation a commencé à être étudiée à la fin des années 90 lors des premières sollicitations de maîtres d'ouvrages, puis reprise lors des recherches de Mériaux et al. (2006); Zanetti (2010b) et Corcoran et al. (2010) montrant l'impact défavorable de la croissance de végétation arborée sur leur sécurité. En effet, la croissance des systèmes racinaires dans les ouvrages hydrauliques en terre tels

2. décret du 11 novembre 2007 et arrêté du 12 juin 2008 concernant les études de dangers.

3. International Levee Handbook

4. Technologies for the cost-effective Flood Protection of the Built Environment

5. Projet national sur l'érosion interne des ouvrages hydrauliques

que les digues de protection contre les inondations induit aussi des risques relatifs aux mécanismes d'érosion. Tout d'abord l'érosion interne liée à la décomposition des racines principales ou à la décompaction des matériaux créant des espaces favorables à la traversée de l'eau dans le corps de digue et donc à son érosion. Ensuite l'érosion externe est le résultat du dessouchage d'un arbre mal ancré, laissant un volume vide équivalent à celui occupé initialement par le système racinaire. Ceci se traduit par l'amincissement du corps de digue qui par conséquent ne correspond plus au dimensionnement initial prévu pour résister à une crue.

Adaptation et développement des méthodes d'imagerie électrique et acoustique pour la cartographie des systèmes racinaires

L'objectif de la thèse est de développer et d'adapter des méthodes non destructives permettant d'imager les systèmes racinaires dans le remblai de la digue et ainsi d'appréhender les comportements à risque vis-à-vis des phénomènes d'érosion. Afin de caractériser les conséquences des systèmes racinaires de la végétation arborée sur la structure et la durabilité des ouvrages en terre, il est nécessaire de définir les positions dangereuses des racines dans le corps de digue.

L'auscultation d'ouvrages hydrauliques se prête bien à un certain nombre de méthodes tels que les méthodes électriques, sismiques, électromagnétiques, thermiques ou encore aéroportées. Chaque méthode mesure une catégorie de paramètres physiques des sols que ce soit la densité, la résistivité électrique, la susceptibilité magnétique, la permittivité diélectrique... Pour la détection et la localisation de racines dans les remblais d'ouvrages hydrauliques, nous avons adopté une stratégie de prospection reposant sur les critères d'efficacité (contrastes), de contraintes (résolution) et de rendement (rapidité de mise en place), basée sur la tomographie de polarisation provoquée électrique et acoustique.

L'extension de la tomographie de résistivité électrique (ERT) à la polarisation provoquée (PP)

De manière générale, l'emploi d'une méthode géoélectrique semble logique car il existe une activité bio-électrique naturelle de la végétation (flux de sève, d'eau à travers le sol). L'arbre semble sensible à ce paramètre. C'est pourquoi la méthode de tomographie de résistivité électrique (ERT) a été largement utilisée pour l'étude de la biomasse racinaire. Son utilisation permet d'obtenir, dans les conditions les plus favorables, une estimation de la distribution et du volume du système racinaire, ce qui ne permet toutefois pas de répondre entièrement à la problématique de détection de développement dangereux de racines isolées par exemple. Pour faire face aux limites constatées, une orientation prometteuse pour localiser avec plus de certitude les systèmes racinaires est de considérer la méthode de polarisation provoquée (PP). Relativement à l'ERT, celle-ci permet d'accéder à une physique additionnelle représentative du milieu appelée *polarisation*.

Développement d'une tomographie acoustique

De façon courante en géophysique appliquée, considérer une approche par une méthode sensible à un paramètre particulier s'avère d'être d'une grande importance pour l'interprétation des résultats. Ainsi, le développement de la tomographie acoustique, sensible au contraste de densité, permet d'obtenir une information complémentaire à l'imagerie électrique. Le choix de la méthode a été guidé par le pouvoir de propagation d'un son à travers le bois (poutre vibrante, instrument...)

Démarche de recherche : une méthodologie du laboratoire vers la digue

Notre travail s'inscrit à la fois dans le développement d'une base théorique incluant une démarche de compréhension des phénomènes permettant d'améliorer la détection, et à la fois dans le cadre d'un environnement professionnel, à vocation de diagnostic et de suivi des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente. Il contient donc une partie à vocation de valorisation applicative.

Le manuscrit s'organise en trois parties :

- la **première partie** dresse le constat de la situation des ouvrages hydrauliques soumis à la croissance de végétation arborée en identifiant la nature des ouvrages concernés. Le diagnostic par des méthodes géophysiques répond à un besoin réel destiné à apporter des solutions non destructives. La recherche bibliographique s'est concentrée sur les approches d'imagerie électrique et acoustique que nous avons retenues pour répondre à cette problématique et sur les techniques de diagnostic géophysique sur les ouvrages ;
- la **seconde partie** constitue la contribution expérimentale de ce travail de thèse. Elle se décline en deux chapitres décrivant les essais menés en laboratoire et en conditions semi-contrôlées pour le développement des méthodes d'imagerie acoustique et électrique. Les conclusions tirées de cette partie permettent de mettre en œuvre efficacement les méthodes in-situ ;
- enfin la **troisième partie** concerne l'application et la valorisation de ces méthodes à travers un cas concret sur une digue. Celle-ci sera abordée avec un regard porté vers le caractère opérationnel des méthodes plutôt que la compréhension des phénomènes.

La conclusion de ce travail vise à présenter un bilan des travaux réalisés, en cours et des propositions pour les travaux futurs.

**Les ouvrages hydrauliques en
remblai soumis à la croissance de
végétation arborée :
du constat d'une situation à
l'expression d'un besoin de
diagnostic géophysique**

CHAPITRE 1

Contexte

Sommaire

1.1 Ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la croissance de végétation arborée : identification, fonctions et constitution	5
1.2 Risques associés à la végétation présente sur les ouvrages hydrauliques	7
1.2.a Les mécanismes d'érosion associés à la végétation	8
1.2.b Facteurs d'influence de l'érosion	9
1.3 Observation du développement des zones racinaires	12
1.3.a Pratiques actuelles : utilisation de méthodes destructives ou de modélisation	12
1.3.b Plasticité des structures racinaires	12
1.3.c Informations "a priori" pour les méthodes géophysiques	15
Synthèse du chapitre	15

Ce chapitre définit dans un premier temps le parc d'ouvrages hydrauliques concernés par la problématique de végétation et sur lesquels les méthodes géophysiques pourront être appliquées. Une seconde partie explicite les différents risques pouvant être rencontrés sur de tels ouvrages, particulièrement ceux liés à la croissance de végétation arborée. Enfin, nous ferons un état de l'art des avancées sur la connaissance des développements des systèmes racinaires par méthodes visuelles et destructives apportant une information "a priori", en amont de l'approche géophysique.

1.1 Ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la croissance de végétation arborée : identification, fonctions et constitution

Identification

La présence de végétation arborée peut être rencontrée sur les ouvrages hydrauliques construits avec des matériaux de remblai dans lesquels les systèmes racinaires peuvent s'implanter et se développer. En effet, les ouvrages hydrauliques en remblai - souvent limoneux - par définition proche de l'eau et/ou en situation de fond de vallée, constituent un substrat idéal pour l'installation puis le développement d'arbres (Zanetti et al., 2011a). Dans la majorité des cas, il s'agit de digues de protection contre les inondations fluviales mais aussi de canaux, de digues de protection maritime ou bien encore de barrages. Même si ce travail s'applique à tous les ouvrages hydrauliques, les plus concernés sont les digues fluviales qui font l'objet dans la thèse d'une analyse particulière.

Fonction principale

Les digues fluviales sont des ouvrages de grand linéaire, construits le long du lit du cours d'eau en surélévation par rapport au lit majeur du fleuve, afin de contenir épisodiquement un flux d'eau et ainsi protéger des zones naturellement inondables appelées "val" (figure 1.1). Ainsi, elles permettent de protéger les parcelles riveraines des venues d'eau lors des crues. La majeure partie du temps, c'est à dire hors période de crue, ces digues ne sont pas soumises à une charge hydraulique et sont donc considérées comme "sèches", ce qui est un aspect important pour le

choix des méthodes de reconnaissance (Fauchard and Mériaux, 2004) que l'on précise dans la section 2.1.

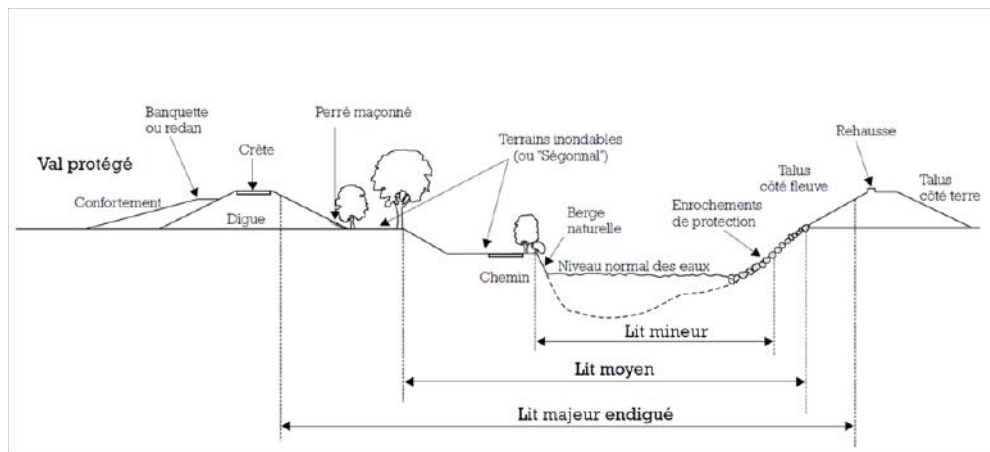


FIGURE 1.1 – Coupe type en travers d'une vallée endiguée d'après Meriaux (2001)

Constitution

La constitution des digues fluviales est variable suivant l'époque de construction et leur implantation géographique, le remblai utilisé étant souvent composé de matériaux d'emprunt extraits à proximité. La plupart du temps constituées de matériaux tels que le sable, limon ou encore l'argile assurant la fonction d'étanchéité, elles subissent de multiples modifications au cours de leur cycle de vie, soit lors d'étapes de construction ou de confortement (rehaussement de la hauteur de digue, recharge intégrée à l'un des talus...) ou bien consécutivement à des réparations (comblement de brèche). Par conséquent, les digues sont des ouvrages hétérogènes tant par leur type que par leur constitution. Cependant, les digues fluviales peuvent être cataloguées selon deux grands types structurels majoritairement rencontrés :

1. les digues en remblai homogène
2. les digues en remblai zoné

Les digues fluviales en remblai homogène

La dénomination "homogène" n'a de sens que si on considère la digue dans son ensemble, ces ouvrages pouvant comprendre des composants distincts par conception (ex : perré de protection) ou suite à des modifications apportées au cours de leur histoire.

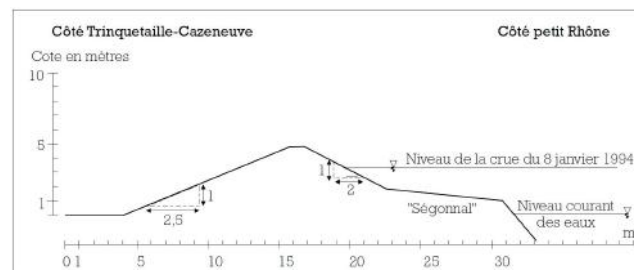


FIGURE 1.2 – Coupe type d'une digue homogène du Petit Rhône en Camargue d'après Meriaux (2001)

La digue en remblai zoné

En général de construction plus récente, les digues sont qualifiées de "zonées" lorsque leur remblai est composé de matériaux différents disposés en couches successives, chacune ayant une fonction particulière. Il peut s'agir d'un noyau argileux ou limoneux assurant l'étanchéité, de matériaux plus perméables (blocs, pierres) pour la stabilité. Ce mode de conception se rapproche des méthodes utilisées pour certains barrages. Un remblai zoné peut également résulter d'un confortement (ex : recharge drainante).

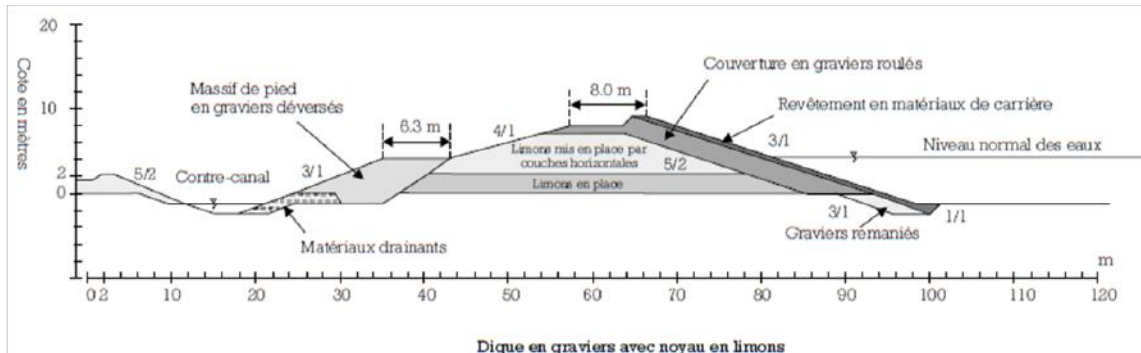


FIGURE 1.3 – Exemple de digue en remblai zoné selon Meriaux (2001) d'après CNR

Afin de simplifier les conditions d'expérimentations, en réduisant le nombre de degrés de liberté du système étudié, les essais de détection proposés dans cette thèse se sont déroulés uniquement sur une digue supposée en remblai homogène (cf. chapitre 7).

1.2 Risques associés à la végétation présente sur les ouvrages hydrauliques

La végétation de type arborée ou non existant sur les ouvrages hydrauliques présente des intérêts écologique, paysager et social. Du point de vue génie civil, la végétation améliore légèrement la résistance à l'érosion superficielle, la stabilisation des pentes (jusqu'à 3 – 5 m de profondeur) par le renforcement des propriétés mécaniques des sols (Stokes et al., 2009; Ghestem, 2012; Ghestem et al., 2013) ou par l'assèchement de la digue grâce aux effets d'absorption. Cependant, les retours d'expérience démontrent que la végétation arborescente ou arbustive n'est pas préconisée, puisque ses effets sont majoritairement très défavorables au contexte de digues. D'après Vennetier et al. (2015a) on recense les désavantages suivants :

- la végétation entrave l'entretien mécanique ;
- réduction de la capacité d'écoulement du lit ;
- favorise le glissement du remblai (à la décrue ou vidange) ;
- favorise la présence des animaux fouisseurs ;
- favorise la formation d'embâcles.

Mais le principal désavantage est que la présence d'arbres sur les ouvrages hydrauliques génère des risques importants, liés à leur système racinaire. Dans son état initial, une digue est conçue afin d'assurer au mieux sa fonction de protection contre les inondations lors d'une crue. Tout changement au cours du temps des propriétés initiales implique nécessairement une modification de sa performance et génère des risques. En ce sens, la croissance des systèmes racinaires modifie les caractéristiques mécaniques (degré de compactage, résistance au

cisaillement) ou hydraulique (perméabilité) des sols.

C'est pourquoi des diagnostics et des évaluations régulières de la sécurité sont de plus en plus préconisées. Les réglementations (décret de 2007 notamment¹) énoncent les principes de gestion et impose un "contrôle de la végétation", sans en détailler les modalités.

1.2.a Les mécanismes d'érosion associés à la végétation

Plusieurs programmes ou compte-rendus de recherche tels que FloodProBE (Technologies for the cost-effective Flood Protection of the Built Environment ; Van Ree et al. (2011)), l'ILH (The International Levee Handbook ; Sharp et al. (2013)) ou encore ERINOH (ERosion INterne des Ouvrages Hydrauliques ; ERINOH (2010)) ont permis de montrer que les mécanismes d'érosion sont les principales causes de rupture des ouvrages hydrauliques en terre (Foster et al., 2000). Or la végétation sur les ouvrages hydrauliques implique deux types d'érosion (Mériaux et al., 2006; Corcoran et al., 2010) :

L'érosion externe

On parle d'érosion externe, lors de l'arrachement d'un arbre sur une digue, par le vent (Drouineau et al., 2000) ou le courant . La stabilité de l'arbre, en fonction des forces extérieures qui s'exercent, dépend de sa capacité de s'ancrer au moyen de pivot et de se stabiliser à l'aide de racines latérales superficielles (Stokes, 1999a). La chute de l'arbre réduit ponctuellement la largeur du remblai si l'arbre se situe sur l'un des talus. De plus cela engendrerait un point bas si l'arbre occupe la crête et si cette dernière est étroite. Il peut en résulter alors, un glissement du talus de l'ouvrage du fait de la rupture de pente (instabilité mécanique), un raccourcissement du chemin hydraulique dans le remblai (ce qui renvoie à un risque d'érosion interne), voire une surverse (au niveau du point bas sur la crête créé par un chablis). L'érosion externe aggravée par la végétation est définie aussi pour qualifier un affouillement du pied ou du talus de l'ouvrage par des courants tourbillonnaires en présence de végétation.



FIGURE 1.4 – *Exemples de cas d'érosion externe (Photographie : C. Zanetti)*

L'érosion interne

L'érosion interne se caractérise par l'entraînement des particules d'un sol sous l'action de l'écoulement qui le traverse (écoulement souterrain). 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 (Mériaux et al., 2006).

- de leur vivant, les racines peuvent avoir une action mécanique défavorable en induisant le décompactage des matériaux de remblai ;
- à sa mort, ou bien sur un arbre adulte même bien portant, les systèmes racinaires se décomposent naturellement (1.2.b). On distingue la décomposition des racines ligneuses

1. Décret no 2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques et modifiant le code de l'environnement

(10 à 15 % de la masse ligneuse totale selon [Vennetier et al. \(2015a\)](#)), d'origines multiples (maladies, attaques de parasites, vieillissement, ou lors de la coupe des espèces qui rejettent), de la décomposition des racines fines qui a lieu en permanence du fait de leur renouvellement continu. La décomposition des racines ligneuses de diamètres importants, laisse des vides, voire des conduits (plus ou moins importants selon le type de sols ([1.2.b](#))), et crée des zones de perméabilité ou d'hétérogénéité dans le remblai pouvant initier des écoulements et un mécanisme d'érosion interne et ce, particulièrement lorsque les racines traversent l'ouvrage. La décomposition des racines fines, radicelles et des poils absorbants (représentant jusqu'à 90% de la longueur totale de racines), responsables de la captation de l'eau et des nutriments, peut modifier les propriétés de perméabilité de l'ouvrage.

Afin de bien appréhender ce phénomène, nous espérons pouvoir estimer à la fois la biomasse racinaire, mais aussi détecter et localiser la présence de racines de diamètres importants à l'aide de méthodes d'imagerie géophysique.



(a) Fontis sur une crête de digue résultant de la probable décomposition d'une grosse souche pour cette digue située en environnement boisé (Photographies : P. Mériaux)



(b) Racines de peupliers dans un trou d'érosion



(c) L'érosion de cette digue du Danube, lors des crues de 1988, révèle des racines venant des arbres visibles à gauche, et ayant traversé le remblai de part en part à la recherche de l'eau du côté rivière. On notera le fort diamètre d'une des racines relativement à celui des troncs. Le déracinement d'arbres proches de la crête a été à l'origine de plusieurs brèches au cours de cette crue

FIGURE 1.5 – Phénomène d'érosion interne : les preuves directes du phénomène d'érosion interne par les racines ne sont visuellement identifiables avant dégradation de l'ouvrage. L'investigation géotechnique de fontis ([1.5a](#)) pouvant mener à des dégradations plus fortes ([1.5c](#)), a néanmoins permis de montrer que certaines de ces dégradations étaient corrélées à la présence de végétation (restes de racines existantes)

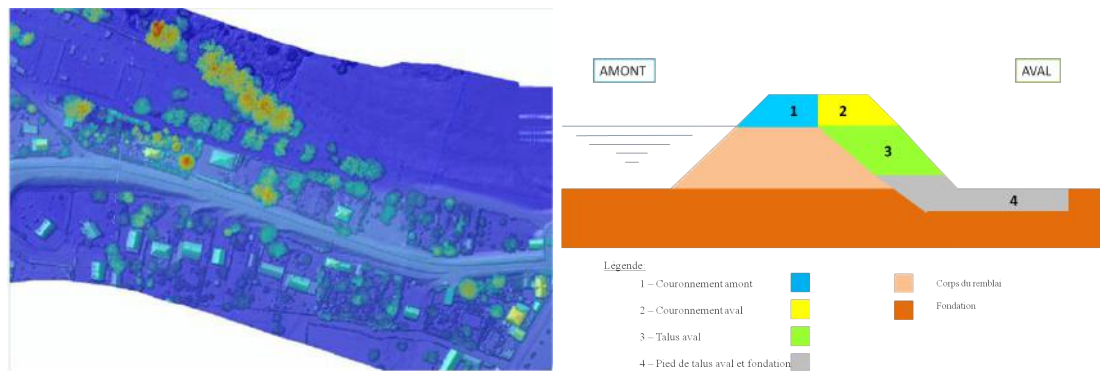
1.2.b Facteurs d'influence de l'érosion

Le développement racinaire dans les ouvrages hydrauliques peut être plus ou moins gênant, vis-à-vis de leur sécurité. Cela dépend essentiellement de quatre paramètres : (i) la densité et la position des arbres, (ii) la structure des systèmes racinaires, (iii) la nature des matériaux constitutifs du remblai et (iv) la cinétique de décomposition racinaire.

Densité et position des arbres

Le LiDAR (Light Detection And Ranging) permet d'estimer la densité d'arbres sur les digues ([L Auriou et al., 2012](#)), d'en estimer le volume foliaire et finalement d'estimer la masse racinaire enfouie correspondante ([Vennetier et al., 2010](#)) (figure [1.6a](#)). A ce stade cette technologie est en-

core peu utilisée car elle nécessite le développement d’algorithmes performants afin d’investiguer de longs linéaires de digues. La densité d’arbre est un paramètre prépondérant ; plus la masse racinaire dans le corps de digue est importante, plus le risque d’érosion est élevé. La position des arbres sur les différentes zones de la digue, couronnement amont ou aval, talus aval, fondation, corps du remblai (figure 1.6b), détermine la potentialité que les racines traversent transversalement le corps de la digue, ce qui favoriserait la manifestation du phénomène d’érosion interne. De plus, la position de l’arbre conditionne le type de structure racinaire, lui même facteur plus ou moins aggravant de l’érosion. L’arbre étant plus ou moins proche de ressources en eau et s’adapte aux différentes conditions de sols, de vent et de pentes (cf. § 1.3.b).

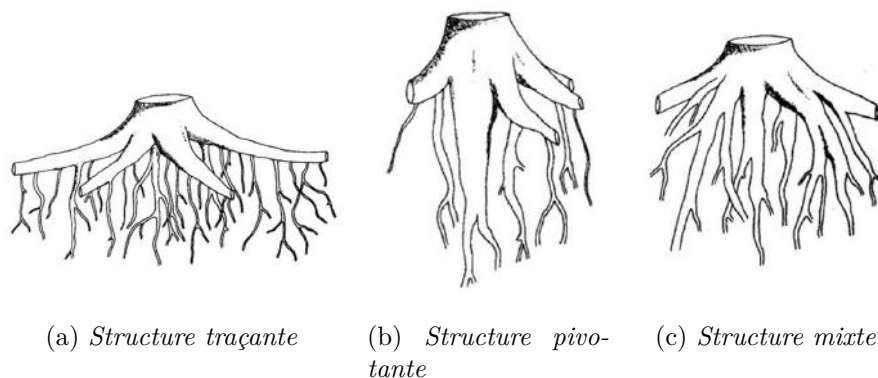


(a) Identification de la densité et de la position de la végétation à l'aide d'image LIDAR (b) Identification des zones de croissances de la végétation (thèse Gisèle Bambara)

FIGURE 1.6 – Densité et positionnement des arbres sur la digue

Structure des systèmes racinaires

Le risque dépend de la structure des systèmes, c’est à dire de la morphologie et de la direction des racines. En dépit des importantes différences entre les systèmes racinaires des arbres et leurs adaptations à différents paramètres (cf. § 1.3.b). Tous les systèmes racinaires ont une organisation commune : la zone de racines latérales dans les sols peu profonds ainsi que celle des racines pivots qui pénètrent elles profondément vers le bas (Foussadier, 2003). Il existe plusieurs méthodes de classification des systèmes racinaires. Afin de bien associer la structure du système à l’importance du risque d’érosion, nous avons choisi la typologie selon Koestler et al. (1968) présentant les structures racinaires en trois types :



(a) Structure traçante (b) Structure pivotante (c) Structure mixte

FIGURE 1.7 – Structure racinaire selon Koestler et al. (1968)

- la **structure traçante** (1.7a) est un système qui présente de longues et grosses racines horizontales restant à la surface du sol en l'absence de pente. Le développement de racines traçantes laisse supposer la possibilité que ces racines peuvent traverser de part en part l'ouvrage, situation la plus propice à l'initiation de l'érosion interne de conduit. De plus, leur ancrage très superficiel en crête peut faciliter le risque de chute et par conséquent entraîner une érosion externe ;
- la **structure pivotante** (1.7b) est composées de grosses racines verticales qui peuvent pénétrer profondément dans le remblai dans le sens vertical. Elle présente a priori moins de sensibilité au risque d'érosion interne de conduit. Le pivot permet un bon ancrage mais la stabilisation par les racines latérales n'est pas optimale. On associe plutôt un risque d'érosion externe à ce type de structure ;
- la **structure mixte** (1.7c) regroupe des racines traçantes et pivotantes, et associe par conséquent les risques énoncés précédemment ;
- la **structure fasciculée** présente de nombreuses racines dans toutes les directions mais de faibles diamètres. Cette structure semble être la moins défavorable à l'initiation des mécanismes d'érosion interne ou externe.

Le risque lié aux racines n'est qu'en partie dépendant du type de système racinaire ; il dépend beaucoup plus du rapport entre taille du système et dimensions de la digue.

Cinétique et degré de décomposition racinaire

Le risque dépend aussi de la cinétique et du degré de décomposition des racines mortes. Durant le cycle de vie d'un arbre, les racines se décomposent naturellement ou s'accroissent sous l'effet de parasites. La décomposition concerne à la fois les racines ligneuses de diamètres importants mais aussi les racines fines : la décomposition des racines fines est systématique et se produit continuellement. La décomposition des racines ligneuses n'est pas systématique puisqu'elle dépend à la fois des espèces, et de la taille des racines.

Les racines possèdent la même structure que le bois de tronc. Elles sont constituées, de façon simplifiée, de trois couches : l'écorce, l'aubier et le duramen (figure 1.8a). Plus la racine est décomposée, plus le trou d'érosion créé est large et plus le risque d'érosion interne est fort.

Lors de la mort de l'arbre (naturelle ou après abattage), toutes les racines meurent dans un laps de temps assez court puis se décomposent plus ou moins vite, selon l'espèce et les conditions climatiques et pédologiques. C'est une situation très délicate vis à vis du risque d'érosion interne.



(a) *Composition du bois de tronc selon Bary-Lenger and Nebout (1993)* (b) *Exemples de décomposition racinaire ; le duramen décomposé crée un trou d'érosion (Photographie : C. Zanetti)*

FIGURE 1.8 – *Composition et décomposition du bois*

La nature des grains d'un sol peut être déterminée par leur taille. Une analyse granulométrique des sols permet ainsi de distinguer plusieurs catégories de matériaux, des plus fins aux plus grossiers. Les argiles, limons, sables, graviers et cailloux constituent les différentes classes d'un sol. Suite à la décomposition racinaire, le conduit est comblé plus ou moins rapidement, selon le matériau constitutif, sous l'effet des forces de pressions et de gravité qui s'exercent. Ceci s'explique par la propriété de cohésion qui définit son aptitude à rester stable sous l'action de forces internes. Les argiles et les limons sont des matériaux cohésifs qui auront tendance à conserver le trou formé par la racine tandis que dans un matériau plus grossier le risque sera moindre, le matériau étant plus meuble (Deroo and Fry, 2014).

1.3 Observation du développement des zones racinaires

Rôle des systèmes racinaires

Les racines remplissent un rôle fondamental puisqu'elles permettent le captage et le stockage des ressources en eau et nutriments contenus dans le sol, ressources nécessaires au fonctionnement d'un arbre. Quelques arbres développent la reproduction végétative par les racines (ex : Robinier) mais ce n'est pas la majorité. D'un point de vue mécanique, elles apportent un ancrage pour sa croissance. Les développements racinaires en terme de morphologie résultent de ces deux conditions.

1.3.a Pratiques actuelles : utilisation de méthodes destructives ou de modélisation

L'étude des systèmes racinaires et particulièrement la définition de leurs structures sont complexes. A titre d'exemple un seul pied de maïs est composé de 13,815,615 branches et présente approximativement une longueur de 622 km et une surface de 237 m² selon Dittmer (1937). Deux approches sont envisageables pour développer des connaissances sur leur développement : l'expérimentation et la modélisation.

Des études expérimentales basées sur l'observation de souches extraites du sol ont permis de comprendre le développement des systèmes racinaires dans les conditions spécifiques de croissance sur les digues et ainsi mettre en avant des facteurs d'influence de l'érosion vis-à-vis de la végétation (Vennetier et al., 2015b). A la suite de ces observations, il est possible de classer les systèmes racinaires suivant différents groupes, à partir d'analyses de ressemblance statistique, mais également de réduire le nombre de critères pertinents (Bodner et al., 2013).

1.3.b Plasticité des structures racinaires

Les études menées récemment par Vennetier et al. (2015b) et Zanetti et al. (2015) ont permis d'identifier les paramètres qui expliquent la façon dont les systèmes racinaires, et plus particulièrement les grosses racines, se développent dans les digues. Ces paramètres sont dépendants : par exemple, la nature des sols conditionne le type de système racinaire. Il est important pour un géophysicien de les expliciter sous forme d'hypothèses car ils vont conditionner la stratégie de prospection géophysique sur le terrain.

i Influence de l'espèce

Hypothèse 1a *Le type de système dépend majoritairement des conditions de sols et d'accès aux ressources.*

L'espèce de l'arbre (figure 1.9) n'est pas le facteur prépondérant sur la structure racinaire recherchée. On privilégiera donc une bonne caractérisation géophysique du type de sol et de son environnement de croissance comme explicité ci-dessous. Certaines espèces (peuplier, saules,

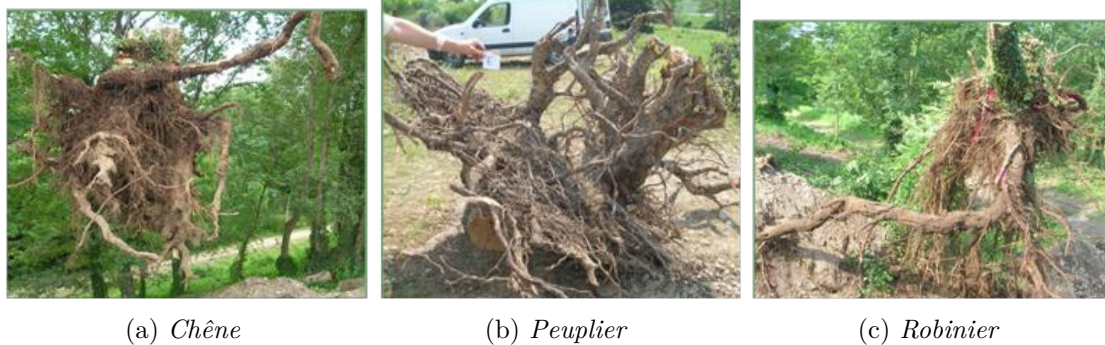


FIGURE 1.9 – Identification des différentes structures racinaires de différentes espèces [Hypothèse 1a]

...) ont cependant une capacité à développer plus ou moins facilement de très grosses racines horizontales ou pivotantes.

ii Influence du type de sol

Sur la structure racinaire

Hypothèse 2a *Le type de sol semble être le paramètre prépondérant sur le type de développement des systèmes racinaires.*

Hypothèse 2b *Quelle que soit l'espèce, les matériaux fins semblent faciliter le développement de structures fasciculées, alors que dans les matériaux grossiers, des structures de type mixte sont plus probables.*

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 notamment par 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 selon Foussadier (2003).

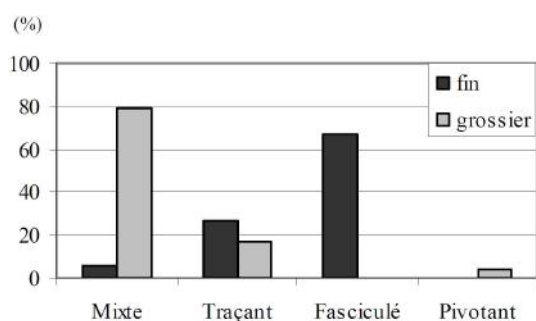


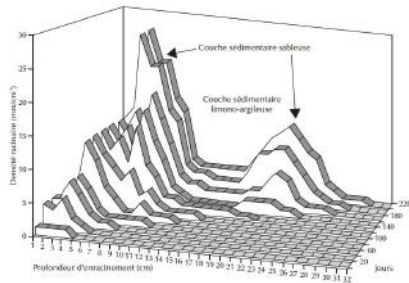
FIGURE 1.10 – Répartition (en terme de pourcentage) des types de structure racinaire en fonction des matériaux, toutes espèces confondues d'après Zanetti (2010a), [Hypothèse 2b]

Sur la densité racinaire

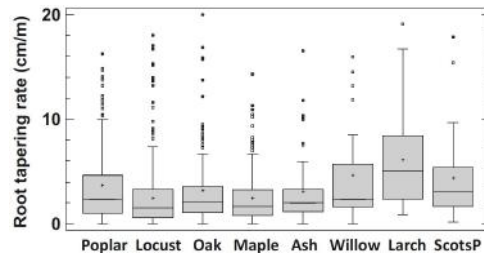
Hypothèse 3a *L'essentiel de l'appareil absorbant est situé près de la surface du sol.*

Hypothèse 3b *En général les grosses racines primaires se situent en surface. Les racines perdent en diamètre lors de ramifications successives. Par conséquent la taille des racines diminue proportionnellement à la distance au tronc (latérale ou profondeur).*

Les ressources minérales sont concentrées dans l’humus par la chute des feuilles et le cycle des éléments nutritifs. Ces éléments sont en effet rares et très limitants pour la croissance des arbres. Il est ainsi vital pour ces derniers de développer des racines en priorité là où les ressources sont le plus disponibles. Une densité plus faible de racines profondes suffit à assurer l’alimentation en eau lorsque le sol se dessèche en surface (Drénou, 2006). Ceci permet de contraindre le domaine et les stratégies de prospection utilisées.



(a) Evolution de la densité racinaire du saule blanc dans un sol stratifié. L’alternance des couches sédimentaires (structure) aux propriétés différentes, caractéristiques des milieux alluviaux, dicte la répartition des racines, qui se développent préférentiellement dans les sédiments de plus grandes porosités, d’après Zanetti (2010a), selon Foussadier (2003) [Hypothèse 3a]



(b) Représentation sous forme de boîte à moustache (médiane et quartiles (traits pleins), moyenne (croix)) du taux d’amincissement selon les espèces d’après Venetier et al. (2015b) [Hypothèse 3b]

FIGURE 1.11 – Influence du type de sol sur la densité et la profondeur de croissance des systèmes racinaires (1.11a) et du taux moyen de décroissance en diamètre des racines (en mm/m)(1.11b)

iii L’interaction avec l’environnement

Position de l’arbre et topographie

Hypothèse 4a Généralement, sur terrain pentu, un grand nombre de racines se concentre dans le talus vers le haut de la pente

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 contraintes externes (vent ou crues) induisent également une adaptation de la morphologie des systèmes racinaires (Dupuy et al., 2005; Stokes, 1999b; 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 (Danjon and Reubens, 2008; Abernethy and Rutherford, 2000; Di Iorio et al., 2005).

Hypothèse 5a *Les racines se concentrent également en direction de l'eau (contre-canal ou rivière) ou de zones plus fertiles et humides (berges).*

D'autre part, il semblerait 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).

1.3.c Informations "a priori" pour les méthodes géophysiques

Les points précédemment énoncés sous forme d'hypothèses seront utilisés en amont afin d'adapter une stratégie de prospection géophysique, puis en aval pour l'interprétation des données. Avant toutes acquisitions expérimentales, il est fondamental d'établir une stratégie de prospection (section 2.1), en fonction de la cible recherchée. Les facteurs cités ci-dessous permettront d'adapter la méthode (maillage, type d'acquisition) la plus adaptée. Aussi, l'interprétation géophysique est complexe car les résultats ne comportent pas une solution unique mais un ensemble de solutions (cf. section 2.2.d). L'information a priori permet dans ce cas de trouver la solution la plus réaliste possible.

Synthèse du chapitre

La thèse de [Zanetti \(2010a\)](#) a dans un premier temps établi les relations entre les facteurs du milieu et le développement racinaire dans les ouvrages, à l'aide de méthodes destructives (excavation et analyse des systèmes racinaires). On peut désormais estimer le risque quand la structure interne de la digue est connue. Cependant, il reste de nombreuses incertitudes : la structure interne des ouvrages est rarement bien connue, les relations avec les facteurs du milieu et développement racinaire comportant des incertitudes, il n'est pas concevable de démanteler systématiquement des portions de digues pour extraire les systèmes racinaires en conditions réelles. Les gestionnaires sont donc à la recherche de méthodes non-destructives. Il est donc essentiel de développer des travaux visant à mettre au point des méthodes et des techniques non destructives permettant de détecter précisément les racines potentiellement dangereuses pour l'ouvrage.

CHAPITRE 2

Application des méthodes géophysiques à l'étude des systèmes racinaires

Sommaire

2.1 Objectifs et adaptation d'une stratégie de prospection	16
2.1.a Objectifs de la mise en place de la géophysique	16
2.1.b Méthodologie générale d'un diagnostic de digue	17
2.1.c Choix de la méthode de prospection	20
2.2 Les méthodes géoélectriques	23
2.2.a Activités bio-électriques et polarisation spontanée des systèmes racinaires	23
2.2.b La tomographie de résistivité électrique	26
2.2.c La polarisation provoquée	33
2.2.d Méthodes d'inversions des données électriques	49
2.2.e Synthèse des méthodes géoélectriques pour la détection de racines et voies d'améliorations possibles	51
2.3 Les méthodes acoustiques	53
2.3.a Rappels sur la propagation des ondes acoustiques	53
2.3.b Stratégie d'acquisition	62
2.3.c Traitement et analyse des données acoustiques	65
2.3.d Synthèse des méthodes acoustiques pour la détection de racines et voies d'améliorations possibles	69
Synthèse du chapitre	71

Au cours de ce chapitre, nous explicitons les motivations pour lesquelles les méthodes géophysiques (non intrusives) sont utilisées pour l'étude des systèmes racinaires tout en rappelant la stratégie de prospection géophysique et ses principes. Nous présenterons par la suite un état de l'art des deux méthodes retenues, à savoir la tomographie électrique et acoustique. Pour chacune de ces deux méthodes, nous précisons les considérations théoriques, les avancées expérimentales pouvant être adaptées à la détection de racine, ainsi que les traitements des données associés.

2.1 Objectifs et adaptation d'une stratégie de prospection

2.1.a Objectifs de la mise en place de la géophysique

Proposer une méthode opérationnelle pour un gestionnaire

Il n'est pas concevable de démanteler systématiquement des portions de digues pour extraire les systèmes racinaires en conditions réelles. Les gestionnaires sont donc à la recherche d'une méthode non-destructive. Les méthodes géophysiques sont potentiellement bien adaptées.

La méthodologie à concevoir afin de détecter et de localiser les racines poussant à travers la structure en terre, devra combiner la connaissance documentaire sur l'ouvrage, l'observation

visuelle et l'acquisition géophysique (électrique et acoustique). Chaque méthode devra trouver une application plus spécifique en fonction des conditions de l'étude. Aussi, au cours de cette thèse il s'agira donc de déterminer quelles sont les méthodes applicables à un contexte donné.

Alimenter un modèle d'évaluation de la performance d'un ouvrage

Les données géotechniques (et géophysiques) et leur interprétation fournissent des éléments d'appréciation de certains facteurs de dégradations de l'ouvrage. La thèse de [Bambara et al. \(2014\)](#) dont l'objectif est d'évaluer la performance a établi un modèle dans lequel les données d'entrée sont à la fois visuelles, mais aussi issues de mesures géotechniques et géophysiques afin d'évaluer, par exemple, les indicateurs de végétation et du remblai explicités dans le tableau 2.1. Nous ambitionnons d'interpréter les résultats issus de mesures géophysiques afin d'en déduire le volume et la structure des systèmes racinaires, mais aussi d'identifier l'environnement de croissance à savoir le type de sol (même si ce dernier a été fixé et n'a pas fait l'objet d'étude durant la thèse) et ainsi de fournir des données d'entrée à ce modèle.

Indicateurs végétation	Indicateurs perméabilité intrinsèque du remblai
Densité individus	Perméabilité du matériau du remblai ou de la fondation
Volume racinaire par individu	Granulométrie du remblai
Structure racinaire des individus	Compactage du remblai
Degré de décomposition des individus (étude de souche)	

Tableau 2.1 – *Critère d'état utilisé pour le modèle d'aide à la décision - Surligné gris : informations que l'on souhaite apporter notamment par les données géophysiques*

2.1.b Méthodologie générale d'un diagnostic de digue

Par définition, le diagnostic d'un ouvrage de génie civil prévoit de déterminer le niveau de sécurité de l'ouvrage, relever ses points de faiblesses, ses défauts et ses dysfonctionnements. A partir du diagnostic il est alors possible de définir judicieusement les travaux qui permettent de remédier aux insuffisances constatées.

[Fauchard and Mériaux \(2004\)](#) décrivent l'ensemble des méthodes géophysiques et géotechniques utilisées pour le diagnostic des digues de protection contre les crues et leur mise en œuvre en trois étapes :

1. L'étude préalable qui consiste à recueillir le plus d'informations possibles en particulier lors d'investigations et de visites techniques approfondies, concernant l'historique de la digue, ses caractéristiques, le système dans lequel elle s'intègre et son environnement géotechnique, hydraulique et géomorphologique.
2. **Les reconnaissances géophysiques.**
3. Essais géotechniques et forages in-situ, de type pénétromètre.

Les reconnaissances géophysiques sont donc un élément essentiel du diagnostic avec l'inspection visuelle (étape 1) et les investigations géotechniques (étape 3). Nous avons réalisé un diagnostic vis-à-vis de la végétation à partir du cas d'étude d'une digue du Rhône (cf. chapitre 7) selon ces trois étapes.

Les reconnaissances géophysiques

Il existe une littérature assez large portant sur les méthodes d'investigations spécifiques aux ouvrages hydrauliques, à savoir aux digues en remblai ([Fauchard and Mériaux, 2004](#)) mais aussi

aux barrages en remblai présentant des problèmes semblables (infiltration d'eau, hétérogénéités, imperméabilités). Les méthodes pratiquées sont d'après [Van Ree et al. \(2011\)](#) :

- induction électromagnétique (Slingram)
- résonance magnétique terrestre ;
- tomographie de résistivité électrique ;
- radar géologique ;
- ondes de surface & sismique réfraction ;
- magnétique ;
- polarisation Spontanée ;
- thermométrie ;
- ...

Parmi celles-ci, les méthodes électriques et sismiques sont très répandues et ont fait preuve d'une grande adaptation pour le diagnostic géophysique d'ouvrages hydrauliques, sachant que leur mise en œuvre est souvent réalisée conjointement, soit avec des investigations géotechniques ([Perri et al., 2014](#)), soit avec une combinaison de méthodes ([Niederleithinger et al., 2008](#)).

L'imagerie par tomographie électrique apporte des solutions aux problématiques rencontrées sur les ouvrages, que ce soit pour caractériser des hétérogénéités de constitution 2D, induites dès la construction ou afin de connaître l'évolution d'un remblai dans le temps lors de dessiccation du sol ([Jones et al., 2014](#)), et pour évaluer l'évolution de la teneur en eau des argiles ([Gunn et al., 2014](#)) ou encore de quantifier l'impact des animaux fouisseurs ([Barner et al., 2001](#)).

La méthode de polarisation spontanée est couramment utilisée pour la localisation spatiale de zones de fuites dans les remblais ([Boleve, 2009](#)) ou lors de monitoring incluant une dimension temporelle ([Boleve et al., 2011](#)). Plus rarement, on utilise les méthodes radar géologique (GPR) ([Antoine et al., 2015](#)) et l'écoute acoustique à travers le corps de digue ([Rittgers et al., 2015](#)) pour détecter des circulations d'eau. Elles ne sont toutefois pertinentes que si l'ouvrage est en charge lors de leur mise en œuvre.

Par comparaison avec les méthodes de prospection géoélectrique conventionnelles, la méthode de polarisation provoquée est une méthode lente et coûteuse et n'a donc pas encore été déployée à ce jour pour le diagnostic de digues ([Palma-Lopes et al., 2008](#)). C'est pourquoi, à l'exception des essais de faisabilité réalisés par [Zanetti et al. \(2011b\)](#) à IRSTEA, au moyen de méthodes de polarisation provoquée (extension de l'ERT), nous n'avons trouvé aucune bibliographie proposant d'adapter des méthodes géophysiques à la caractérisation des hétérogénéités créées par les systèmes racinaires de la végétation arborée dans le contexte des digues. Aussi, le cadre de notre bibliographie s'est volontairement extrait du domaine génie civil vers d'autres champs d'application tels que l'agronomie ([Amato et al., 2008](#)), la physiologie des arbres ([Aubrecht et al., 2006](#); [Guyot et al., 2013](#)) ou encore dans le domaine de l'hydrologie des sols ([Lo et al., 2007](#); [Ursino et al., 2013](#)).

Précautions et spécificité de la mise en œuvre de méthodes géophysiques dans le contexte des digues

Une digue est un ouvrage ayant une géométrie particulière que l'on peut décrire suivant deux axes principaux : l'axe longitudinal et l'axe transversal (figure 2.2). La pente, naturellement de longueur plus importante dans la direction de l'axe transversale modifie les propriétés de propagation des champs physiques et doit être prise en compte. En comparant une modélisation numérique avec des cartographies expérimentales de sols de plantation d'hévéa, [Pasquet et al. \(2011\)](#) ont montré l'effet des topographies complexes sur les valeurs de résistivité électrique. Lors de l'acquisition, selon [Hennig et al. \(2005\)](#) et [Tsourlos et al. \(1999\)](#), certaines configurations d'électrodes (Half-Wenner) sont moins sensibles à la topographie que d'autres. Lors du traitement des données, il existe des méthodes de correction topographique, les équations physiques étant résolues en considérant la géométrie réelle de l'ouvrage ([Fargier et al., 2014](#); [Jodry et al., 2014](#); [Fargier et al., 2012](#)). Malgré ces efforts, il convient d'être prudent sur l'interprétation

conduite sur des données pour des topographies complexes.

Aussi, il est important de tenir compte des conditions de charge hydraulique (existante ou non) au moment de l'acquisition puisque cela influe sur la hauteur de la ligne piézométrique (ligne de pression nulle) dans le corps de la digue. Ainsi les matériaux grossiers favorisent le drainage des remblais et le rabattement de la ligne piézométrique, et les matériaux fins retiennent l'humidité et favorisent les remontées capillaires.

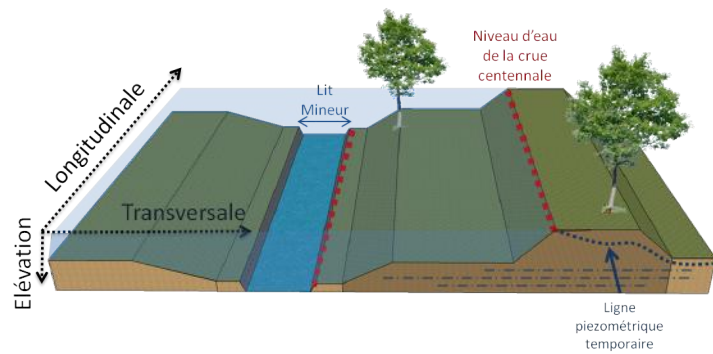
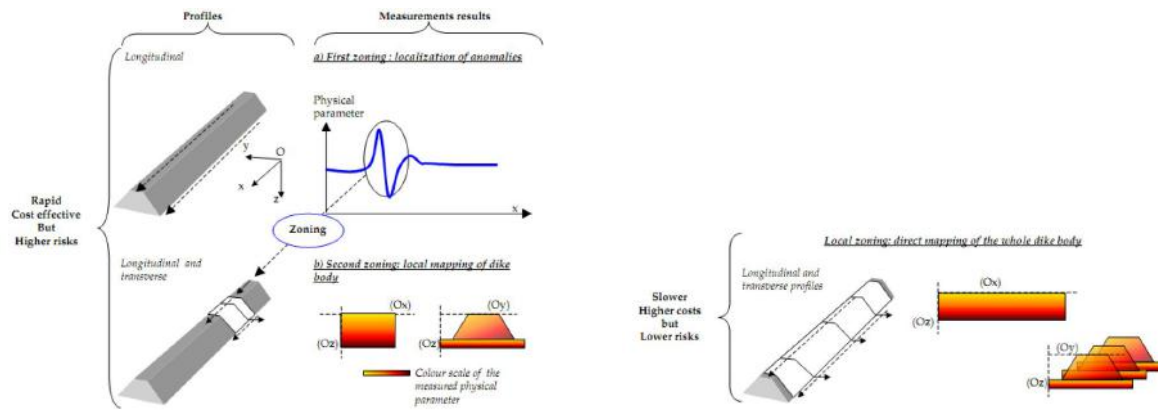


FIGURE 2.1 – *Ouvrage 3 dimensions (longitudinal, transversale, profondeur), soumis à un chargement hydraulique lors d'une crue - Ligne piézométrique (pointillé bleu) lors d'une charge correspondant à une crue centennale.*

Pour les digues à charge temporaire, on considère que la ligne piézométrique, en dehors de période de crue est définie par la hauteur de la nappe phréatique. Dans ce cas, la tranche de sol investiguée sur toute la hauteur de la digue est non saturée et peut être considérée comme présentant une teneur en eau homogène (sans considérer les autres facteurs comme la végétation, les variations de températures ou l'influence des précipitations récentes). Dans le cadre de cette thèse, on se limite à l'étude des digues sèches, le cas général lorsque l'on prospecte une digue de protection. Dans ce cas il n'existe pas de ligne de saturation dans le remblai.

Les reconnaissances géophysiques sur une digue consistent à déduire les caractéristiques internes de l'ouvrage en étudiant les variations d'un champ physique mesuré sur l'ouvrage. Le résultat d'une reconnaissance géophysique doit permettre de donner une image interne de l'ouvrage sur tout le linéaire, reflétant la présence d'hétérogénéités créées par les systèmes racinaires. Pour cela, les mesures sont effectuées en deux temps selon les préconisations de [Fargier et al. \(2012\)](#) : une première évaluation à l'aide de profils longs de la variabilité globale de l'homogénéité de l'ouvrage et l'identification des anomalies, puis une prospection plus fine aux positions de ces anomalies.



(a) Première étape : reconnaissance globale rapide

(b) Seconde étape : reconnaissance précise

FIGURE 2.2 – La principale approche recommandée pour la prospection géophysique première approche, localisation des anomalies, seconde approche pour la cartographie locale du corps de digue d'après ERINOH (2010)

On se propose d'appliquer cette approche pour l'imagerie des systèmes racinaires. Dans un premier temps, à partir de profils longitudinaux, on cherchera à reconnaître l'homogénéité globale de la digue et l'extension des systèmes racinaires. Dans un second temps, un profil de plus haute résolution nous permettra d'étudier plus en détail la direction, l'extension et la profondeur des racines principales, pour un arbre donné (Thèse B. Mary, 2015).

2.1.c Choix de la méthode de prospection

Chaque méthode mesure une catégorie de paramètres physiques du milieu investigué que ce soit la densité, la résistivité électrique, la susceptibilité magnétique ou encore la permittivité diélectrique. Ainsi pour la détection et la localisation de racines dans les remblais d'ouvrage hydraulique nous avons préalablement effectué une recherche des méthodes, volontairement large, afin d'adapter la meilleure stratégie de prospection reposant sur les critères suivants :

1. **L'efficacité** : l'efficacité d'une méthode est basée sur le contraste des propriétés physiques (densité, résistivité électrique, susceptibilité magnétique...) entre l'anomalie recherchée par rapport à son environnement, c'est-à-dire ici la racine par rapport au sol.
2. **Les contraintes** :
 - *Contraintes de mise en œuvre sur site* : cf. § 2.1.b
 - *Le dimensionnement de la zone à prospecter*
 - la profondeur d'investigation souhaitée : l'enracinement des arbres peut être très profond, cependant, en général, les racines se développent en surface (cf. § 1.3) et les digues les plus hautes s'élèvent à environ 6 m. La profondeur d'investigation souhaitée permettant d'avoir une idée déjà satisfaisante sur la structure du système racinaire est donc volontairement fixée à 3 m avec une profondeur effective (profondeur à laquelle la portion de terrain située au-dessus de cette limite a la même influence que la portion de terrain située au-dessous) approximativement à 1 m ;
 - l'extension latérale : l'arbre peut produire de longues racines traçantes. Suivant sa position par rapport au corps de digue, nous serons donc amenés à étudier l'extension des systèmes racinaires sur de grandes distances que l'on évalue approximativement à 10 m.
 - *La résolution proportionnellement à la taille de l'anomalie recherchée*
Un système racinaire est composé de racines principales de diamètre plus important

que les racines issues de ramification avec décroissance en diamètre à chaque étape de ramification. La mesure intégrera donc nécessairement un ensemble de racines de différentes tailles. Cependant, vis-à-vis du phénomène d'érosion interne, pour des racines isolées, on estime que la détection des racines principales (de diamètres supérieurs à 10 cm à proximité du tronc) est un bon indicateur du risque (même si en pratique une racine fait rarement plus de 10 cm sur toute la traversée d'un remblai et que des racines plus petites peuvent être dangereuses si elles sont longues et nombreuses).

3. **Le rendement** : le choix de la méthode doit tenir compte des contraintes de temps et économiques qui seront imposées par les gestionnaires à qui s'adresse la méthode. Bien que cette thèse propose des résultats issus de laboratoire, nous avons eu le souhait de garder en vue cet aspect. Des propositions d'amélioration du rendement sont discutées dans la section ??.

Parmi les méthodes recensées dans le contexte des digues (cf. § 2.1.b), certaines peuvent être éliminées (RMT, Magnétique) car elles ne permettent pas de cartographier les racines, et ce, principalement pour des raisons de résolution insuffisante. En revanche, la méthode GPR a fait l'objet de tests de faisabilité préalables.

Les méthodes radars (GPR)

La détection de racine par radar géologique (GPR) a fait l'objet de nombreuses études au cours des dernières années (Barton and Montagu, 2004; Cox et al., 2005; Morelli et al., 2007; Zenone et al., 2008; Ferrara et al., 2014; Guo et al., 2013). Cependant, compte tenu de la constitution structurelle des ouvrages hydrauliques en remblai, les mesures GPR présentent de nombreuses limites et en premier lieu, leur faible pénétration des matériaux conducteurs. On présente ci-dessous un exemple de radargramme obtenu dans l'étude d'IRSTEA (figure 2.3) sur une digue du Petit Rhône. Le site présente des particularités connues, telles que la présence d'une conduite mais aussi d'arbres sur le talus côté fleuve avec probablement des systèmes racinaires dans le corps de digue (chênes et peupliers blancs plus ou moins épars sur le talus côté fleuve, certains étant implantés à 1 m du bord de la crête de constitution limono-argileuse). En combinant l'information obtenue à plusieurs fréquences (250 et 500 MHz), la canalisation et les racines sont difficilement identifiables. On constate d'après la figure 2.3, pour la détection des racines, que les signaux sont atténués à très faible profondeur dans les matériaux fins conducteurs (typiquement limoneux) et de nombreux échos brouillent le signal dans les matériaux graveleux.

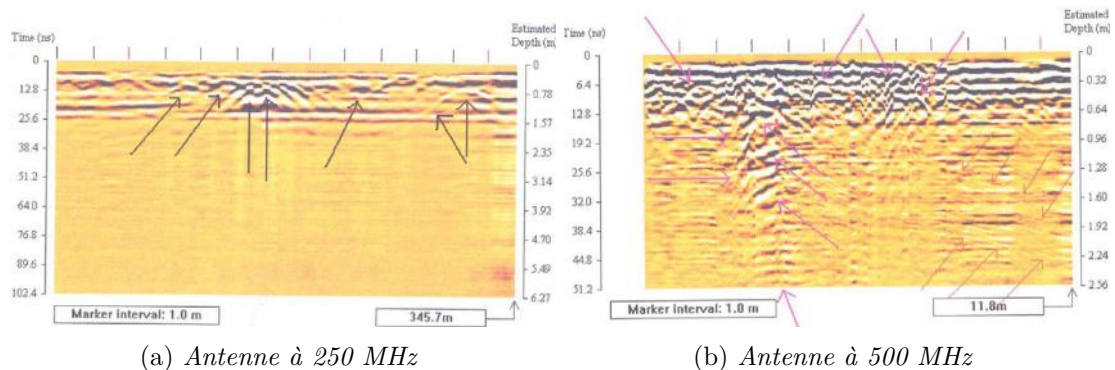


FIGURE 2.3 – Radargramme d'un profil à proximité d'arbres; les flèches roses indiquent la présence hypothétique de racines, les flèches rouges, la probable stratigraphie (limites entre les couches de terre) (Source : IRSTEA)

Orientations à privilégier

Parmi les méthodes utilisées dans les mesures de reconnaissance sur les digues, les méthodes de résistivités électriques répondent potentiellement aux critères d'efficacité, de contraintes et de rendement énoncés précédemment. Cette méthode doit cependant être adaptée et développée pour répondre à la problématique de la détection.

2.2 Les méthodes géoélectriques

Cette section présente dans un premier temps les phénomènes bio-électriques d'origine naturelle liés à l'activité de l'arbre. Puis on introduit, de la théorie vers la pratique, les concepts de la mesure de résistivité électrique classique (ERT) et de son extension la polarisation provoquée (PP), tout en relevant leurs potentiels d'application à la détection racinaire. Pour chacune des méthodes, nous identifions qu'elles en sont les limites et les lacunes et nous proposons les développements et les stratégies d'adaptation que nous avons mis en place pour y faire face.

2.2.a Activités bio-électriques et polarisation spontanée des systèmes racinaires

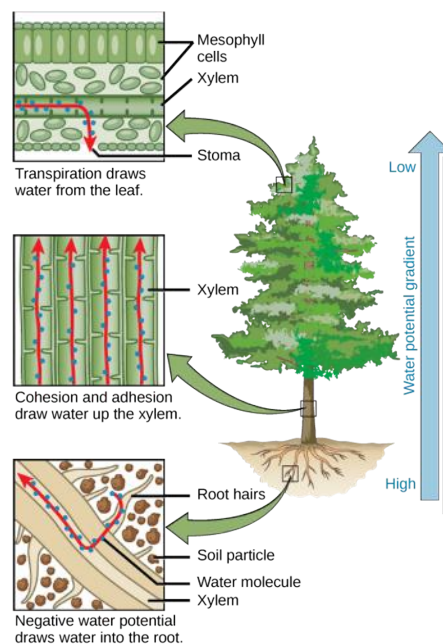
On distingue parmi les méthodes géoélectriques les méthodes de mesure passives et actives (ou induite).

La méthode du potentiel spontané consiste en la mesure passive du potentiel existant à la surface de la Terre ou en forage, ou des différences de potentiels du champ électrique associé à des mécanismes de polarisation naturels dans le sous-sol. Or, il existe un potentiel naturel lié à différentes contributions bio-électriques lors du fonctionnement d'un arbre et son système racinaire. En théorie, en analysant la distribution de potentiel, il est possible de retrouver les caractéristiques de la source ayant créé l'anomalie de potentiel c'est-à-dire sa profondeur, sa dimension (Saracco et al., 2004) et son activité.

i L'eau, de l'absorption à la transpiration

Un courant électrique est un déplacement d'ensemble de porteurs de charges. L'eau, étant composée de particules électriquement chargées (ions hydrogènes et oxygène) en mouvement, induit la formation d'un courant électrique. Or, les phénomènes d'absorption par les racines, puis de transport de sève, et enfin de transpiration sont des phénomènes de la circulation de solutions aqueuses à la base du bon fonctionnement d'un arbre. Il est important de bien comprendre l'activité naturelle bio-électrique dont les racines sont l'objet de par leur fonctionnement afin d'évaluer leurs effets sur les mesures géoélectriques.

FIGURE 2.4 – *Circulation de l'eau, absorption par les racines, transport dans le tronc par cohésion et absorption dans les cellules du xylem, transpiration par les feuilles d'après Boundless (2015)*



Comme représenté sur la figure 2.4, les variations des flux de sève et la transpiration sont directement en lien avec les variations d'absorption d'eau dans le sol, elles mêmes dépendantes des systèmes racinaires (Moreno et al., 1996). Par la suite, nous décrivons les liens existant entre les flux de sève et l'absorption d'eau avec la génération d'un potentiel électrique naturel mesurable au niveau des racines ou directement à même le sol par des électrodes.

Fonctionnement des racines

On distingue chez l'arbre mature deux grands types de racine suivant leur nature et fonction : (i) les racines ligneuses, principales (ou charpentières) qui assurent l'ancrage de l'arbre, ou qui jouent un rôle d'exploration du sol (recherche des ressources disponibles), (ii) les racines non ligneuses, principalement composées de racelles associées à des 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. Le xylème et le phloème constituent les cellules de transport. Le transport de l'eau et des sucres à travers ces cellules, s'effectue respectivement des racines vers la partie aérienne pour le xylème, au contraire, de la partie aérienne vers les racines pour le phloème.

ii Exploiter les phénomènes d'absorption d'eau et la polarisation spontanée

En réalité, l'absorption d'eau par les racines dépend non seulement de la distribution spatiale des racines, mais aussi de la dimension temporelle tenant compte des besoins de l'arbre et des ressources en eau. L'étude de Doussan et al. (2006) montre, par modélisation des paramètres du sol et de la plante et lors d'expérimentations, qu'il se forme un front d'extraction d'eau à proximité des racines et en fonction des propriétés hydrauliques du sol. Nous reviendrons plus en détail sur les variations de teneur en eau des sols et leurs impacts sur les mesures géoélectriques (cf. section 2.2.b § ii).

La polarisation spontanée à l'interface sol-racine

Il existe un potentiel d'origine bioélectrique induit par la présence de végétation sur un site d'étude, et plus particulièrement par la présence de réseaux racinaires notamment autour des arbres (Boleve, 2009). Comme nous l'avons évoqué, la consommation d'eau par les plantes engendre une circulation hydrique, et par conséquent, un potentiel électrique. C'est la ségrégation de certains minéraux par les plantes lors de l'absorption d'eau qui entraîne la formation d'un gradient de concentration ionique à l'interface entre la racine et le milieu poreux et qui génère l'apparition d'un potentiel électrique de l'ordre du millivolt.

iii Tirer profit des flux de sève

D'après Gibert et al. (2006), il existe des variations de la distribution du potentiel électrique de l'ordre de 25 mV, mesurées à l'aide d'électrodes implantées directement dans le tronc de l'arbre et dans les racines que l'on peut associer aux variations de flux de sève journalier (figure 2.5). D'autre part, l'étude de Le Mouël et al. (2010) relate des variations de potentiel électrique transitoire (jusqu'à des valeurs de 10 à 50 mV) sur un peuplier équipé d'électrodes. La fréquence d'apparition des signaux ne dépend ni de la saison ni du moment de la journée. Cette étude suggère que les variations de potentiel sont causées par le passage des nuages d'orage, qui pourrait induire des charges dans le sol et donner lieu à un courant circulant à travers les racines vers le tronc de l'arbre.

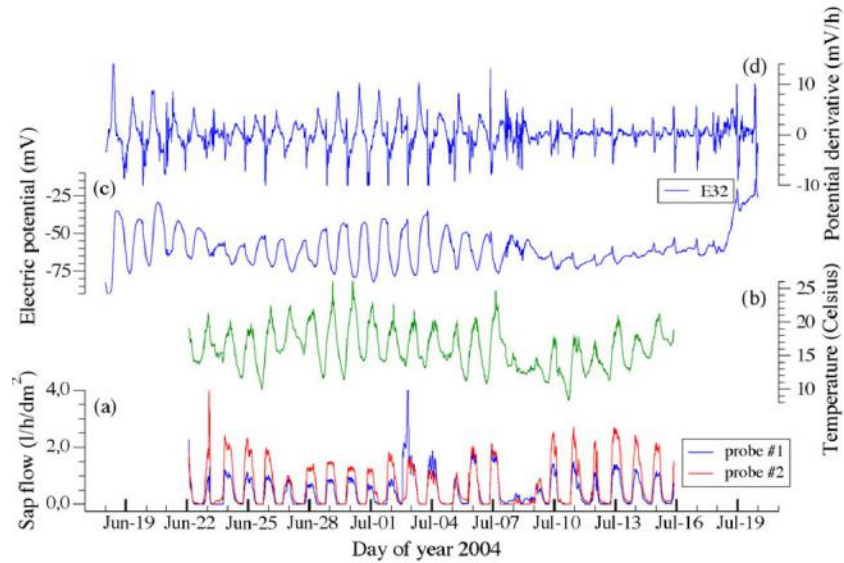


FIGURE 2.5 – (a) Flux de sève mesuré sur deux capteurs, proches de l'électrode 32, située sur le tronç. (b) Température extérieure. (c) Potentiel électrique mesuré sur l'électrode (E32). (d) Dérivée première de l'évolution temporelle du potentiel montré en (c). Les repères sur l'axe des abscisses indiquent 24h (Gibert et al., 2006)

Les variations de flux de sèves observées ont, au delà du potentiel électrique généré, pour conséquence de modifier les teneurs en eau du bois du tronç et des racines. On distingue trois principaux états d'humidité du bois. L'état intermédiaire (entre 0 et inférieur à 30 %, l'eau est liée aux parois cellulaires), le point de saturation des fibres (PSF, ou saturation des parois cellulaires, 30 %) et la saturation complète (lorsque les parois cellulaires et les lumens sont remplis d'eau, supérieur à 30 %). Le taux d'humidité des arbres sur pied peut varier de 50 % environ jusqu'à plus de 100 % selon plusieurs critères tels que l'espèce, les ressources ou encore la saison.

iv Limites observées et propositions

L'amplitude des anomalies du potentiel électrique d'origine naturelle semble néanmoins trop faible pour obtenir une information précise sur la masse racinaire, ainsi que sur les racines isolées en particulier avec la profondeur. De plus, ces phénomènes dépendent de conditions environnementales sur lesquelles nous ne pouvons pas agir directement. L'effet naturel de polarisation dépend entre autres de l'intensité des phénomènes d'absorption, des saisons, de facteurs environnementaux externes (orages). Nous verrons que ces variables influencent aussi le résultat des méthodes de mesures de résistivité électrique. Une bonne connaissance de ces phénomènes permettra de tirer profit de cette activité naturelle en identifiant les conditions les plus favorables à la mesure. A titre d'exemple, nous proposerons lors de notre étude expérimentale, un monitoring d'une placette expérimentale après irrigation contrôlée, afin de tirer profit des zones d'absorption préférentielle d'eau pour déterminer la morphologie du système racinaire.

Naturellement, les amplitudes du potentiel électrique généré par les activités bio-électriques à l'interface sol/racine sont trop faibles pour localiser les racines. Il faut donc apporter une énergie supplémentaire afin de forcer le système à répondre et ainsi obtenir anomalies localisables. C'est ce que propose la méthode de tomographie de résistivité électrique.

2.2.b La tomographie de résistivité électrique

La méthode d'imagerie de résistivité électrique (ERT) est une méthode non destructive permettant, à partir de mesures en surface, d'investiguer le sol (section 2D ou volume 3D) et son évolution temporelle (4D). Contrairement à la méthode du potentiel spontanée, l'ERT est une méthode active. Elle est sensible au contraste de résistivité de la racine relativement au sol environnant. La structure recherchée est appelée anomalie de résistivité. Le choix de techniques d'imageries électriques est pertinent pour de nombreuses études de la couche superficielle du sol telles que l'étude de sites contaminés (Naudet, 2004) ou encore afin de répondre à diverses problématiques en géologie et archéologie.

i Principe de la méthode

L'injection d'un courant électrique dans le sous-sol engendre un champ de potentiel. Pour une source ponctuelle située à la surface d'un demi espace homogène, le potentiel électrique en tout point du sous-sol, dérivé des équations de Maxwell, est donné par :

$$\Phi = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (2.1)$$

- Φ , le potentiel électrique (V) ;
- ρ , la résistivité du sol ($\Omega \text{ m}$) ;
- I , l'intensité du courant injecté (A) ;
- r , la distance à la source de courant (m).

Dans la pratique, on mesure à l'aide de quatre électrodes une différence de potentiel. Deux électrodes, C_1 et C_2 , servent à injecter un courant continu d'intensité connue I dans le milieu (figure 2.6), tandis que deux autres électrodes, P_1 et P_2 , permettent de mesurer une différence de potentiel $\Delta\Phi$ induite par le passage de ce courant.

Le potentiel électrique en tout point du sol est donné par :

$$\Phi = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{C_1}} + \frac{1}{r_{C_2}} \right) \quad (2.2)$$

La différence de potentiel électrique est mesurée entre deux autres électrodes (P_1 et P_2) :

$$\Delta\Phi = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{C_1 P_1}} - \frac{1}{r_{C_2 P_1}} - \frac{1}{r_{C_1 P_2}} + \frac{1}{r_{C_2 P_2}} \right) \quad (2.3)$$

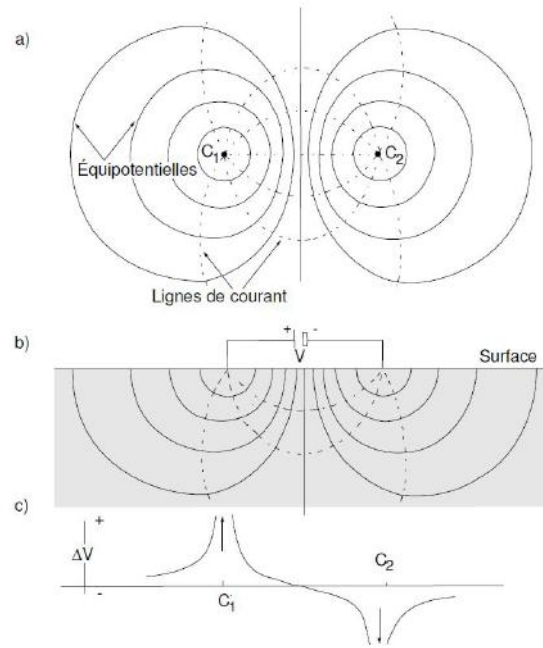


FIGURE 2.6 – *Lignes de courant et équipotentiellles pour deux électrodes d'injection au dessus d'un sol homogène. a) vue en plan, b) vue en coupe, c) voltage le long de l'axe recoupant C_1 et C_2 (Caruba et al., 1974)*

La résistivité (ou son inverse la conductivité), dérivée de la loi d'Ohm, est donnée par la relation :

$$\rho = k\Delta\Phi/I = \frac{1}{\sigma} \quad (2.4)$$

- ρ , la résistivité électrique ($\Omega \text{ m}$);
- σ , la conductivité électrique (S m).

La résistivité est qualifiée d'"apparente" lorsque la mesure intègre un certain volume du terrain dont les propriétés électriques sont hétérogènes dans l'espace (la conductivité "vraie" pouvant varier d'un point à l'autre). Cette conductivité apparente dépend aussi de la géométrie d'acquisition définie pour différentes dispositions d'électrodes. Le facteur k , permet de corriger la géométrie selon la configuration des électrodes.

Les différentes configurations d'électrodes

Différentes configurations d'électrodes peuvent être obtenues en faisant varier : (i) l'ordre des électrodes ($C_1C_2P_1P_2$, $C_1P_1P_2C_2$, ...), (ii) les distances entre électrodes de mesures et d'injection (paramètres n et a). La figure 2.7 montre la géométrie des configurations Schlumberger et Wenner α .

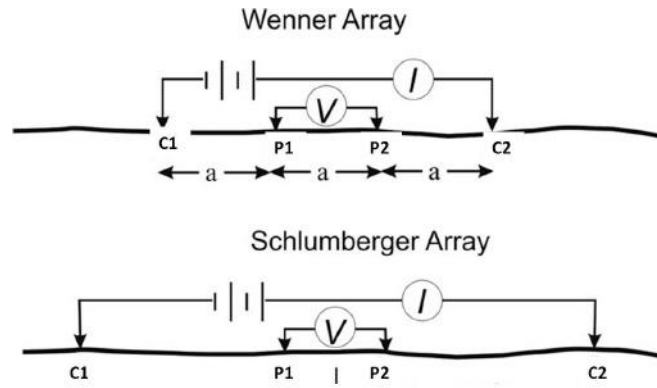


FIGURE 2.7 – Schéma de la configuration d'électrodes Schlumberger et Wenner α inspiré de Richard (2011)

- Schlumberger avec $k = \pi n(n + 1)a$, $a = P_1P_2$ et $n.a = C_1P_1 = P_2C_2$;
- Wenner α avec $k = 2\pi a$, $a = C_1P_1 = P_1P_2 = P_2C_2$;
- Dipole-Dipole avec $k = \pi n(n + 1)(n + 2)a$, $a = C_1C_2 = P_1P_2$ et $n.a = C_2P_1$;
- Pole-Pole $k = 2\pi a$, $a = C_1P_1$.

Chaque configuration d'électrodes possède des sensibilités différentes. Au cours de nos mesures, nous avons principalement travaillé avec la configuration Wenner-Schlumberger (configuration hybride de Wenner et Schlumberger) qui permet d'avoir un bon compromis entre résolution verticale et résolution horizontale, mais aussi parce qu'elle fonctionne bien pour des investigations de faibles profondeurs et est sensible aux hétérogénéités tridimensionnelles. Cependant, suivant les situations et les cas d'études, nous serons parfois amenés à tester d'autres configurations.

Contrôles qualité

Le contrôle de la qualité des données post-acquisition est d'autant plus important lorsque l'on travaille sur des mesures haute résolution. C'est le cas des racines qui sont des hétérogénéités proches, de petite taille. Tout au long des prospections menées, nous avons contrôlé les facteurs suivants :

- Enfoncement des électrodes : le champ de potentiel est conforme à l'hypothèse d'injection ponctuelle à partir d'une distance égale à quatre fois la profondeur d'enfoncement ;
- Ecartement des électrodes : les erreurs de position engendrent principalement des effets de type "P", compris entre $\pm 12\%$ pour $MN=1a$ et $\pm 4\%$ pour $MN=3a$. Ce bruit structuré peut être filtré efficacement avant l'inversion avec un logiciel (ex : X2IPI effectuant une procédure de filtrage par la médiane) ;
- Résistances de prise : des résistances de prise hétérogènes détériorent la qualité de l'image ERT. Ce bruit aléatoire peut être filtré efficacement lors de l'inversion avec RES2DINV (ou tout autre logiciel d'inversion) ;
- Niveau de signal : intensité du courant ≥ 5 mA et potentiel mesuré ≥ 10 mV ;
- Reproductibilité des mesures.

ii Les différents modes de conduction électrique

Dans un système solide-eau, la conductivité électrique peut être définie comme étant la combinaison de deux contributions différentes. Il s'agit (1.) de la conductivité électronique (ou

métallique) des solides, analogue à celle des métaux et (2.) de la conductivité électrolytique c'est-à-dire de l'eau dans les pores.

1. La conductivité peut être le fait d'un déplacement d'électrons, c'est la **conductivité électronique**. Généralement négligeable, elle peut devenir importante lors de la présence de certains gisements de minerais tels que les sulfures, les oxydes ou le graphite.
2. Dans la majorité des cas, la conductivité résulte du transport de charge par les ions de l'électrolyte en présence d'un champ électrique, c'est la **conductivité électrolytique**. Ce mécanisme dépend principalement de la salinité de l'électrolyte ainsi que de la température du fluide. Cette conductivité peut être divisée en une partie volumique et/ou surfacique :
 - La première situation (volumique) correspond au courant électrique circulant, porté par les charges ioniques dans les pores et/ou les fractures de la roche ;
 - Le second cas (surfacique) correspond à une conductivité liée à un excès de charges au niveau de l'interface minéral/électrolyte créé par la présence de charges à la surface des minéraux du milieu traversé. Cet excès est responsable d'une conductivité spécifique (appelée conductivité de surface) qui augmente avec la surface spécifique du minéral et peut devenir non négligeable, comme dans le cas des minéraux argileux.

iii Facteurs d'influence de la résistivité électrique

Dans la plupart des sols, la conductivité électrique peut être décrite comme une fonction dépendante : du volume poral, de la saturation en électrolyte, de la minéralisation de celui-ci (concentration en espèces ioniques présentes, viscosité, mobilité ionique des ions présents dans le fluide), de la teneur en argile et de la température .

Effets de la porosité et de la teneur en eau

La porosité d'un milieu poreux désigne la fraction volumique de l'ensemble des espaces vides (pores) existants dans le milieu, rapportée au volume total du milieu en question. On a :

$$\Phi = \frac{V_{vides}}{V_{total}} \quad (2.5)$$

- V_{vides} , le volume de vide (des pores) ;
- V_{total} , le volume total.

Certaines définitions introduisent une porosité dépendante des constantes propres au type de sol (a et m).

La loi d'Archie (Ancn, 1942) :

La loi d'Archie relie empiriquement la résistivité électrique ρ_r d'un sol saturé (Ωm) et sans argile à la résistivité électrique ρ_w du fluide poral grâce à la porosité Φ d'après la relation :

$$\rho_r = \rho_f a \Phi^{-m} \quad (2.6)$$

- le facteur a dépend de la lithologie et varie entre 0.6 et 2 ;
- m , le facteur de cimentation, dépend de la forme des pores, du compactage, et varie entre 1.3 pour les sables non consolidés à 2.2 pour les calcaires cimentés.

2nd loi d'Archie :

Lorsque la saturation (S) en eau diminue, la conduction électrolytique diminue et la résistivité de la roche augmente. [Ancn \(1942\)](#) donne également une relation semi-empirique incluant cette propriété, que l'on appelle souvent la deuxième loi d'Archie :

$$\rho_r = \rho_f \Phi^{-m} S^{-n} \quad (2.7)$$

- S la saturation en eau ;
- n , l'exposant de saturation, ajustable, généralement compris entre 1,3 et 2 pour des roches non-consolidées et proche de 2 pour des roches consolidées.

La teneur en eau volumique est un facteur influençant la conductivité (figure 2.9), la conduction électrique étant assurée par la solution ionique (l'électrolyte). En mécanique des sols, la teneur en eau Θ est pondérale définie par la relation :

$$\Theta = m_f / m_s \quad (2.8)$$

- Θ , teneur en eau naturelle du sol (kg/kg) ;
- m_f , masse d'eau que le sol contient (kg) ;
- m_s , masse de ses particules solides sèches (ou masse sèche (kg)) ; la masse sèche est obtenue par dessiccation du sol pendant 24 heures à l'étuve à 105 °C.

Propriété des matériaux argileux

Dans des sols argileux, la conduction électrique se rencontre à la fois dans les pores mais aussi à la surface des particules argileuses chargées. La présence d'argile dans une roche poreuse contribue largement à augmenter sa conductivité électrique ; c'est pourquoi la loi d'Archie (qui dépend uniquement de la porosité et de la teneur en eau) définie dans l'équation 2.6 ne s'applique pas à un sol qui possède une part argileuse importante.

La conduction de surface, au niveau de l'interface liquide/solide, se manifeste par une double couche électronique décrite dans un premier temps par les modèles de [Gouy \(1910\)](#) et [Chapman \(1913\)](#) (couche électrochimique diffuse proche de la surface des grains), puis reprise par [Stern \(1924\)](#) qui inclut la taille des grains.

Cette double couche se forme afin de rétablir l'électro-neutralité. Des cations libres présents dans l'électrolyte migrent vers la surface des minéraux et se déplacent de façon tangentielle à la surface des grains.

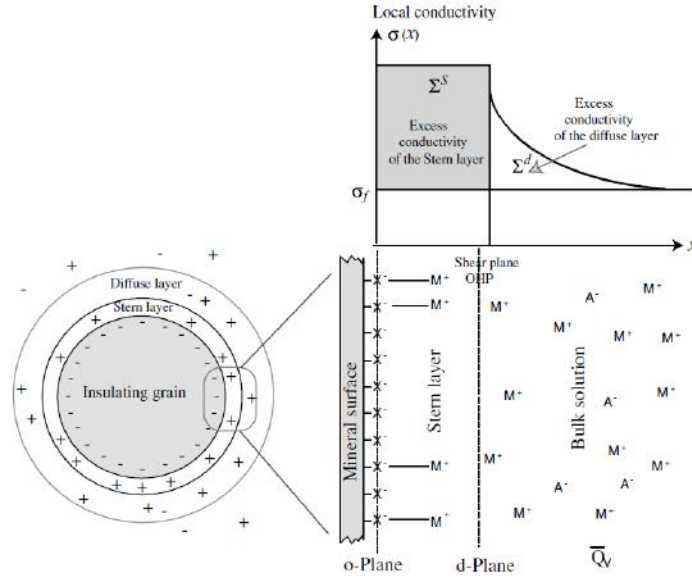


FIGURE 2.8 – Schéma de la distribution des espèces ioniques dans l'espace des pores d'un milieu poreux chargé à l'équilibre, d'après [Revil and Florsch \(2010\)](#). L'eau interstitielle est caractérisée par une densité de charge volumique \bar{Q}_v correspondant à la charge de la couche diffuse par unité de volume de pores (en $C.m^{-3}$). La couche de Stern est responsable d'un excès de conductivité de surface Σ^s (en S) en fonction de la conductivité de l'eau interstitielle σ_f tandis que la couche diffuse est responsable d'un excès de conductivité de surface Σ^d . La couche de Stern est comprise entre le plan o (surface de minérale) et le plan d, qui est le plan interne de la couche diffuse électrique. La couche diffuse se prolonge à partir du plan d vers les pores

Le modèle de la double couche électronique est à nouveau discuté dans la section sur la polarisation provoquée (cf. section 2.2.c).

Effets de la température

La résistivité électrique ρ_T d'un sol à la température T (°C) peut être associée à une résistivité électrique standard mesurée à 18°C par [Keller and Frischknecht \(1966a\)](#) :

$$\rho_T = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha(T - 18^\circ)} \quad (2.9)$$

— α un paramètre empirique qui est approximativement de l'ordre de 0.025 /°C

D'après le relation 2.9, une augmentation de la température implique une diminution de la résistivité (augmentation de la conductivité).

iv Application aux systèmes racinaires

En plus des paramètres prépondérants sur la conductivité énoncés précédemment, s'ajoutent les paramètres électriques propres aux racines et aux fonctionnement des réseaux racinaires.

Propriétés électriques & types de racines

En premier lieu, la gamme de résistivité des racines dépend de leur fonction. Au sein même des racines ligneuses, les propriétés électriques changent en fonction de la zone, ce qui est remarquablement mis en avant lors de tomographies à l'aide d'électrodes disposées en cercle sur le tronc (le bois de tronc ayant la même structure que le bois de racine cf. chapitre 1 section 1.2.b). Ainsi, [Guyot et al. \(2013\)](#) montre que la méthode de tomographie de résistivité permet de différencier le duramen de l'aubier. La couche d'écorce se comporte comme une couche

isolante électriquement et le duramen apparaît plus résistant électriquement que l'aubier. Ceci s'explique bien par la distribution des ions contenus dans les différentes zones. Typiquement pour la détection in-situ, les grosses racines, à cause des effets du bois mort et de la couche isolante d'écorce, apparaissent plus résistantes que les racines fines (Amato et al., 2009; Zenone et al., 2008).

La décomposition des racines a aussi un effet notable sur les mesures de résistivité. Toujours lors de prospection de troncs d'arbres sur pied, Hagrey (2007) a constaté que la résistivité électrique est plus faible en présence d'arbres en décomposition.

Propriétés électriques & densité racinaire

Récemment le développement de techniques haute résolution a ouvert des possibilités pour l'étude de la zone racinaire. L'étude de Zenone et al. (2008) décrit le travail réalisé sur des Pins et montre que la forme, la distribution et le volume des systèmes racinaires peuvent être associés aux variations 3D de résistivité du sol. De même, après avoir instrumenté un arbre et réalisé des mesures destructives de densité racinaire et d'autres mesures complémentaires (granulométrique, teneur en eau, pH), l'étude de Amato et al. (2008) montre que la tendance spatiale de la résistivité du milieu correspondrait étroitement à la densité racinaire. Les zones de fortes résistivités peuvent être interprétées comme des volumes où le flux de charges électriques est ralenti à cause des cellules mortes constituant l'écorce isolante (Werban et al., 2008).

Propriétés électriques & effets d'absorptions d'eau

Comme nous l'évoquions dans la partie sur l'activité bio-électrique naturelle des arbres, des flux d'eau à travers le sol résultent de l'absorption par les racines. Les propriétés électriques d'une zone racinaire sont principalement la conséquence de la teneur en eau des racines. Dans ce sens, des études proposent un suivi temporel (monitoring) par tomographie de résistivité électrique afin d'identifier des vitesses et directions d'eau préférentielles à proximité des systèmes racinaires. Les résultats sur de petites espèces montrent des corrélations entre la présence de racines et les variations de teneurs en eau (Petersen and Hagrey, 2009; Werban et al., 2008). Dans la majorité des cas, il se produit un assèchement plus rapide en présence de réseaux racinaires. Les variations observées sont journalières avec une variabilité de la teneur en eau du milieu plus forte le matin et l'après midi. Garré et al. (2013, 2011, 2012) confirme l'efficacité d'un suivi temporel, tout en sachant que dans des conditions humides, il pourrait être difficile de distinguer l'absorption de racines isolées, la redistribution spatiale de la teneur en eau des sols étant rapide et globale.

Propriétés électriques & effets saisonniers/journaliers

Selon la saison et l'heure, les racines transportent plus ou moins de charges électriques car la composition de la sève est variable, et les flux de sève sont variables en intensité et en direction. En automne, la sève redescend dans les racines et dans le tronc des réserves et des éléments nutritifs. A partir de ce moment la partie aérienne de la plante entre en repos végétatif. Mais les racines, elles, continuent de pousser. Au printemps, c'est le processus inverse. Des manifestations de ces effets seront explicités plus en détail dans la partie portant sur les mesures de conductivité complexe. D'autre part, le jour, la sève descendante emporte dans toute la plante et jusqu'aux racines, les sucres formés par la photosynthèse, tandis que le flux montant apporte les éléments nutritifs et l'eau nécessaire à la transpiration. La nuit, la plante redistribue les réserves de sucres et entretient la respiration qui consomme peu d'eau.

v Limites observées et propositions

Jusqu'à maintenant, la méthode ERT a été couramment employée pour l'étude de la biomasse racinaire (Amato et al., 2008, 2009). L'utilisation de l'ERT donne principalement une approximation de la distribution et du volume du système racinaire. Ceci constitue une première limite à laquelle nous essaierons de faire face car, dans ce cas, la résolution n'est pas suffisante pour discriminer les développements dangereux de racines. Récemment, Mancuso (2011) et Vanderborght et al. (2013) ont proposé une synthèse des méthodes utilisées pour l'étude des propriétés des zones racinaires. Ils ont souligné de nombreuses lacunes et développements nécessaires de l'approche électrique. Parmi les limites soulignées, la principale est le fait que la tomographie de résistivité classique est une détermination indirecte de la présence de racines. En effet, dans certains cas, la gamme de résistivité du sol et des racines se superposent (figure 2.9).

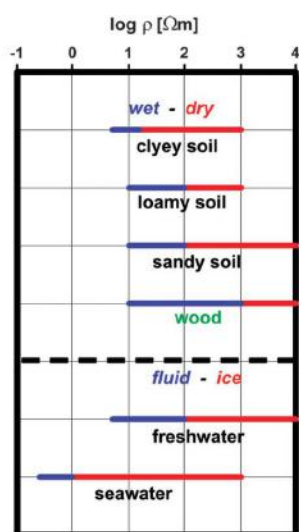


FIGURE 2.9 – Résistivité ρ des sols et du bois selon Hagrey (2007), inspiré de Keller and Frischknecht (1966b)

Parmi tous les paramètres énoncés précédemment (type de racines, états de décomposition, effets saisonniers) qui influent sur la largeur de la gamme de résistivité des racines et des sols, les variations de teneurs en eau semblent prépondérantes. Lors de nos expérimentation en conditions contrôlées, nous avons tenté d'évaluer le sens et le poids de chacune des variables vis-à-vis de la détectabilité des racines.

2.2.c La polarisation provoquée

Une approche prometteuse pour cartographier plus précisément les systèmes racinaires est de considérer la méthode de polarisation induite (IP : induced Polarisation ou PP : polarisation provoquée). Relativement à la résistivité électrique classique, cette méthode inclut une dimension temporelle et permet d'accéder à une physique supplémentaire appelée polarisation (cf. ii), pouvant provenir de différentes sources (cf. iii). La dimension temporelle est liée à la dépendance temporelle de la réponse d'un matériau consécutivement à une stimulation électrique par un champ électrique alternatif. On utilise couramment l'analogie avec une résistance et une capacité électrique qui emmagasine puis restitue l'énergie électrique dans le temps, ce qui s'applique particulièrement pour la modélisation de la réponse des racines (cf. vi).

i Principe de la méthode

Historiquement, cette méthode a tout d'abord été développée pour la prospection minière par les frères Schlumberger (Schlumberger, 1920), puis des applications aux études de sols ont vu le

jour depuis le début des années 1980 (Olhoeft, 1985; Vanhala et al., 1998). Depuis, la puissance de cette méthode augmente grâce à la fois à la compréhension des phénomènes de conduction électrique, et au développement d'appareils de mesure de plus en plus performants. En effet, les propriétés électriques d'un sol ne se limitent pas à l'effet de résistivité que l'on considère en ERT (Kemna et al., 2000). Les sols se comportent à la fois comme des conducteurs électriques purs 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 l'impédance définie par :

$$Z(\omega) = \frac{v(t)}{i(t)} \quad (2.10)$$

Où, $v(t) = V \sin(\omega t + \Theta)$ et $i(t) = I \sin(\omega t)$ sont respectivement la tension alternative appliquée et le courant résultant. Ici, V et I sont la tension et le courant mesuré aux bornes des électrodes respectives.

Pour décrire les propriétés électriques d'un matériau, comme pour la méthode de résistivité classique (ERT), nous utilisons aussi le concept de résistivité ρ et de son inverse, la conductivité σ , directement liée à la loi d'Ohm suivante (sous sa forme complexe, dérivée des équations de Maxwell) :

$$\text{Loi d'Ohm : } j^*(\omega) = \sigma^*(\omega) \vec{E} \quad (2.11)$$

- ω , fréquence angulaire (pulsation en rad/s) ;
- $j^*(\omega)$, densité de courant volumique (A m) ;
- $\sigma^*(\omega)$, conductivité complexe ;
- \vec{E} , champ électrique résultant (V/m).

ii La mesure de polarisation provoquée P.P

La polarisation provoquée spectrale

La PPS est une mesure de l'impédance fréquence par fréquence (Lesmes and Friedman, 2005). A chaque fréquence, un courant sinusoïdal est injecté dans le milieu et la différence de potentiel est mesurée au cours du temps. Le courant appliqué (A) induit un signal potentiel (V), qui est décalé en temps. Le rapport d'amplitude des deux signaux correspond à l'amplitude de la résistivité ρ (en $\Omega.m$) ou son inverse σ et le décalage temporel est relié à l'angle de phase ϕ (en mrad ou $^\circ$)

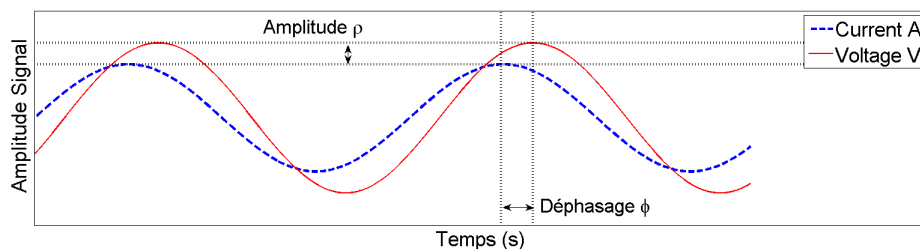


FIGURE 2.10 – Signaux de formes sinusoïdales montrant le courant appliqué (A) et le signal de potentiel mesuré (V) pour la mesure de résistivité complexe à une fréquence (pulsation ω) fixée

La conductivité s'écrit sous la forme complexe et fait apparaître sa dépendance en fréquence (ω) selon la relation suivante :

$$\sigma^*(\omega) = |\sigma(\omega)|e^{i\Phi(\omega)} \quad (2.12)$$

$$= (\sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega)) \quad (2.13)$$

Avec,

- $|\sigma(\omega)|$, module ($\Omega \text{ m}$);
- $\Phi(\omega)$, phase (rad).

et ω la pulsation (fréquence angulaire) et i le nombre complexe. Les parties réelles (σ') et imaginaires (σ'') sont toutes les deux dépendantes de la fréquence. La composante en phase correspond à la conductivité intrinsèque alors que la composante en quadrature correspond aux effets de polarisation.

Ces différentes définitions conduisent à différentes possibilités de représentation du signal de Polarisation Provoquée Spectrale.

Les différentes représentations du signal PPS

- Première forme : décomposition du signal en module, $|\sigma^*|$, et phase, ϕ en fonction de la fréquence ω . Par convention, la phase est représentée négativement $-\phi$ et en mrad ; La conductivité électrique σ incluant à la fois les effets de conduction et de polarisation, qui sont présentés dans la relation complexe suivante :

$$|\sigma^*(\omega)| = \sqrt{(\sigma'(\omega))^2 + (\sigma''(\omega))^2} \quad (2.14)$$

$$\phi(\omega) = \arctg\left(\frac{\sigma''(\omega)}{\sigma'(\omega)}\right) \quad (2.15)$$

- Seconde forme : les parties réelle $Re(\sigma^*)$ et imaginaire $Im(\sigma^*)$ du signal sont exprimées en fonction de la fréquence. De même que pour la phase, la partie imaginaire est aussi représentée par son opposée $-Im(\sigma^*)$ afin de représenter des "pics" positifs dans le signal de polarisation provoquée spectrale.

Chacune de ces représentations présente des avantages et des inconvénients en fonction de ce que l'on veut illustrer. A partir de chacune d'elles, il est possible d'identifier l'origine des variations de conductivité complexe. Par exemple, si des variations sont visibles sur le terme de phase et pas sur la partie imaginaire de la conductivité alors la conductivité électrolytique est affectée par la conductivité porale du fluide uniquement et non par la conductivité de surface.

Instruments commerciaux

Lors de cette thèse, nos mesures de PPS sont réalisées avec les instruments SIP-Fuchs III¹ (laboratoire) ainsi que le LIPPMANN² (laboratoire et in-situ). Les caractéristiques de ces instruments ne sont pas similaires :

- le LIPPMANN permet une mesure de la résistivité complexe de 0.26 à 25 Hz sur 5 décades de fréquences alors que le SIP-Fuchs III de 1,43 mHz à 20 kHz sur un nombre défini de décades de fréquences ;

1. [SIPFUCHS manuel utilisateur d'instructions](#)

2. [LIPPMANN manuel utilisateur d'instructions](#)

- l'injection du courant émis par le SIP-Fuchs III peut être amplifiée par une unité de puissance de 600 W. Celle-ci a été utilisée lors de l'analyse intrinsèque des échantillons racinaires ;
- Le SIPFUCHS utilise des fibres optiques pour la transmission des données et la synchronisation du système afin de supprimer les phénomènes de couplages entre les câbles et le sol.



FIGURE 2.11 – Utilisation de l'instrument LIPPMANN en mode sondage ABMN lors de mesure de polarisation provoquée spectrale in-situ ; électrodes d'injection métallique, électrodes de mesures de potentiel imparlarisables de type Petiaut

La polarisation provoquée temporelle

La PPT est une mesure utilisant un courant pseudo-continu (Lesmes and Friedman, 2005). Celui-ci est injecté sous la forme de créneaux : chaque cycle de mesures est décomposé généralement en quatre temps symétrique (ou non), un temps d'injection positif suivi d'une coupure du courant d'injection, puis un temps d'injection négatif suivi à nouveau d'une coupure. En théorie, la chargeabilité est le rapport entre la différence de potentiel mesurée juste après l'arrêt de l'injection (V_p) et entre la différence de potentiel maximale durant l'injection du courant (V_0). En pratique, un délai avant la mesure est nécessaire pour s'assurer qu'il n'y ait plus d'effets transitoires comme les réponses électromagnétiques. Le temps de mesure est divisé en "fenêtres".

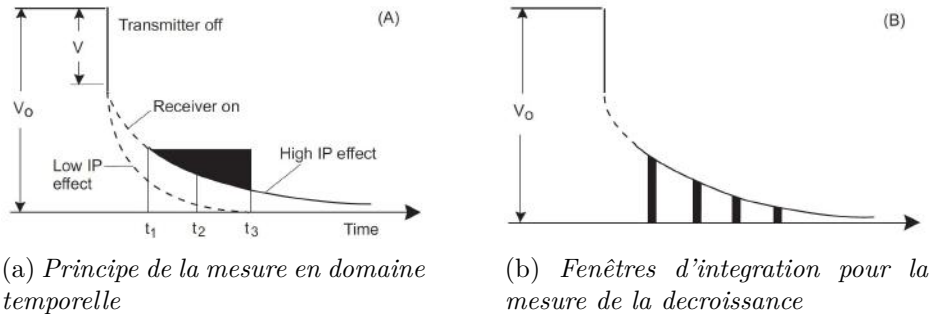


FIGURE 2.12 – Courbe de décharge selon Caruba et al. (1974)

La différence de potentiel est intégrée sur chacune des fenêtres. La forme la plus couramment mesurée de domaine temporel IP est l'aire sous la courbe de décroissance, spécifié par l'équation suivante :

$$M_{t_i t_{i+1}} = \frac{1}{V_0} \int_{t_i}^{t_{i+1}} V(t) dt \quad (2.16)$$

- $V(t)$, décroissance du potentiel (mV) ;
- M , chargeabilité (ms ou mV/V) ;
- $t_i t_{i+1}$, temps initial et final de l'intégration de la courbe de décharge.

Instruments commerciaux

Nos mesures de PPT sont réalisées à l'aide de deux instruments commerciaux très semblables en terme de caractéristiques techniques et de fonctionnement : le Terrameter SAS4000 ABEM³ ainsi que le SYSCAL PRO⁴. Ils diffèrent par le nombre de fenêtres d'intégration pour le calcul de la chargeabilité partielle possible. Il est de 10 pour l'ABEM tandis qu'il est de 20 pour le SYSCAL, qui permet donc une meilleure évaluation de la courbe de décharge. Dans les deux cas, la répartition des durées de ces fenêtres peut être définie manuellement ou selon des modes enregistrés (arithmétique, semi-logarithmique, logarithmique). Afin de moyennner le bruit, il est recommandé d'utiliser une incrémentation logarithmique de la durée des fenêtres d'intégration. Les temps d'injection utilisables avec ces appareils sont de 0.25, 0.5, 1, 2, 4 et 8 s, ce qui correspond en fréquence approximativement à une gamme située entre 0.25 et 64 Hz.



FIGURE 2.13 – *Utilisation du Terrameter SAS4000 lors de mesure de polarisation provoquée temporelle in-situ - Centrale d'acquisition relié à un switch multichannel - Batterie d'alimentation et câbles de connexion*

iii Mécanismes de polarisations

La polarisation est un mécanisme qui rend compte du déplacement local ou de la réorientation des charges liées lorsqu'on applique un champ électrique extérieur. En régime sinusoïdal, les mécanismes de polarisation dépendent fortement de la fréquence du champ électrique appliqué. En fonction des types de charges impliqués, on peut différencier plusieurs mécanismes et associer une fréquence de relaxation qui détermine la gamme de fréquences jusqu'à laquelle ce type de polarisation peut être observée.

Type de polarisation	Description du mécanisme	Fréquence de relaxation
Electronique	Distorsion des couches électroniques par rapport au noyau atomique	10^{15}
Atomique	Déplacement des atomes les uns par rapport aux autres au sein d'une molécule	10^{12} à 10^{13}
Dipolaire	Réorientation des molécules dipolaires	10^9 à 10^{11}
D'interface	Déplacement local des porteurs de charges jusqu'à atteindre un piège électronique ou chimique	$<10^7$

Tableau 2.2 – *Types de polarisation rencontrés dans les milieux poreux et gamme de fréquences associées, inspiré de Gueguen and Palciauskas (1992)*

Ainsi, dans le cadre de cette thèse, les mécanismes de polarisations que nous prenons en compte sont ceux situés à relativement basses fréquences, nos mesures n'ayant pas intégrées les fréquences au delà de 10^3 Hz. Typiquement les instruments de polarisation provoquée spectrale couvre la gamme de fréquences entre 10^{-3} et 10^3 Hz (comprenant que les mécanismes d'interface

3. [Terrameter SAS 4000 manuel utilisateur d'instructions](#)

4. [SYSCAL Pro manuel utilisateur d'instructions](#)

d'après le tableau 2.2). Dans cette gamme, seuls les mécanismes de polarisation suivants doivent être pris en compte pour l'interprétation des données (Reynolds, 2011) :

1. la polarisation d'électrode ;
2. la polarisation attachés à la double couche électrique.

La polarisation d'électrode

La polarisation d'électrode a lieu en présence de particules minérales (pour lesquelles les porteurs de charge sont des électrons) dans le milieu poreux, ou plus généralement lorsque le courant passe d'un mode de conduction ionique à un mode de conduction électronique. L'application d'un champ électrique entraîne alors une répartition dissymétrique des électrons dans le corps métallique et les charges ioniques s'accumulent à sa surface. Quand le courant est interrompu, le voltage résiduel existant au niveau de la particule métallique décroît continuellement car les ions se rediffusent progressivement dans les pores de l'électrolyte. C'est ce qui crée l'effet de polarisation provoquée (Parasnis, 1966).

Méthodes de contrôle de la polarisation d'électrode

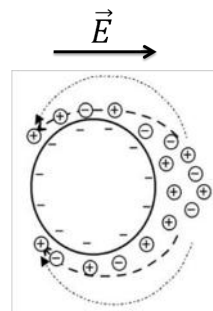
La polarisation d'électrode affecte les mesures à basses fréquences (< 100 kHz) en produisant une résistance supplémentaire (en série) par rapport au "vrai" circuit du courant. Cette polarisation d'électrode dépend de la fréquence, de la concentration ionique, du voltage et de l'électrode utilisée (Kuang and Nelson, 1998). Sur un terrain fortement compacté, tel que sur une digue, il n'est pas envisageable d'implanter des électrodes impolarisables qui limiteraient cet effet indésirable, celles-ci étant plus fragiles et difficiles à enfoncer (sur une profondeur suffisante permettant un bon contact sol/racine). Nous serons donc amenés à vérifier la dérive induite par la polarisation d'électrode sur nos mesures P.P.

Ceci sera discuté dans la partie (39) présentant les bonnes pratiques pour la mesure PP.

La polarisation attachée à la double couche électrique

Nous avons vu la représentation de la double couche électronique décrivant la distribution des espèces ioniques dans l'espace des pores lorsque l'on se trouve à l'équilibre présentée dans la figure 2.8. Les mécanismes de polarisation ont lieu lorsqu'un courant produisant un champ électromagnétique est appliqué.

FIGURE 2.14 – Déformation de la double couche électronique lors de l'application du champ électrique \vec{E} extérieur, selon Reynolds (2011)



Lors de l'application d'un champ électrique, les couches de Stern et la couche diffuse se polarisent. Nous ne présentons pas les phénomènes décrivant précisément ces polarisations car cela dépasse le cadre de cette thèse et le lecteur intéressé pourra consulter les travaux de Dukhin et al. (1974); Shilov et al. (2001) et Leroy and Revil (2004). En revanche, nous introduisons des détails sur les différentes polarisations dites de "membranes" (ou électrolytique).

La polarisation de membrane

Afin de décrire ce phénomène, nous nous inspirons de la description proposée par Kiberu (2002). Il existe une nette charge négative à l'interface entre la plupart des minéraux et les pores. Les charges positives dans le fluide interstitiel sont attirées vers la surface du minéral et développent une couche chargée positivement, alors que les charges négatives sont repoussées (figure 2.15a). Lorsque le canal du pore a un diamètre inférieur à la taille de la couche négative formée, le flux d'ions, lorsqu'un champ électrique est appliqué, est bloqué. Les ions négatifs vont quitter la zone rétrécie et les ions positifs vont augmenter leur concentration, produisant ainsi une différence de potentiel (ΔV) à travers le blocage. Lorsque le champ électrique appliqué est éteint, le déséquilibre de la concentration ionique revient à la normale par diffusion, ce qui produit la réponse IP mesurée.

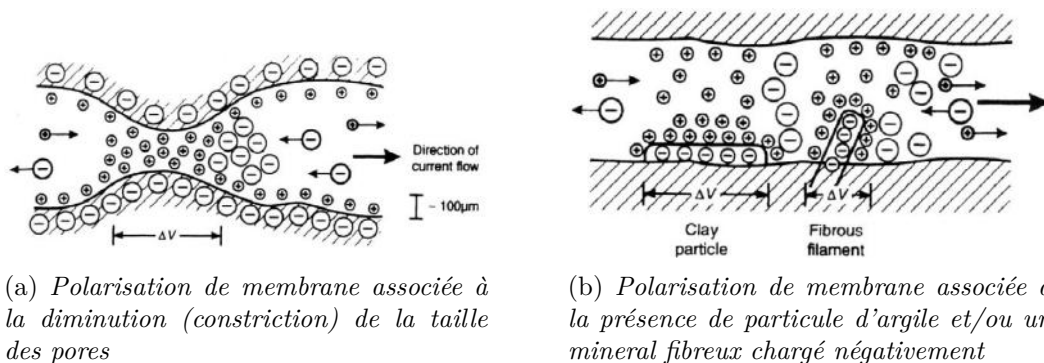


FIGURE 2.15 – Différents mécanismes de polarisation de membrane selon Reynolds (2011)

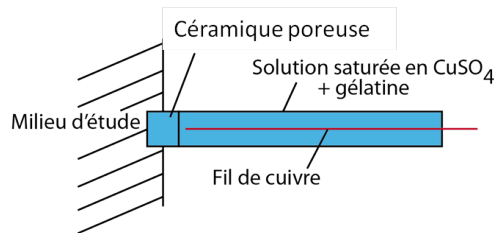
Les particules d'argiles présentent une charge négative et par conséquent attirent les ions positifs de l'électrolyte présent dans les capillaires d'un agrégat d'argile (figure 2.15b). Une double couche électronique se forme donc à la surface de la particule d'argile. Si la zone se charge positivement assez loin dans les capillaires, elle repousse les ions chargés positivement et ainsi agit comme une membrane imperméable au mouvement de l'électrolyte dans le capillaire.

iv Bonnes pratiques pour les mesures de polarisation provoquée

Aux bonnes pratiques de l'ERT (acquisition réciproque pour estimer les erreurs de mesures, résistances de contact des électrodes faibles) s'ajoutent essentiellement deux recommandations pour la réalisation de mesures en polarisation provoquée.

— Le choix des électrodes pour la mesure de potentiel

Les électrodes impolarisables ont un potentiel propre (self-potential) à priori à la fois plus stable dans le temps mais aussi vis-à-vis des variations de température que les électrodes dites polarisables. Ces électrodes sont de nature chimique différentes déterminant leurs propriétés de stabilité. Leurs conceptions consistent à immerger le métal (*Cu*, *Pb*, *Ag*, ...) dans une solution sursaturée de leurs propres sels (respectivement *Cu/CuSO₄*, *PbCl₂*, *AgCl*, les ions *Cl* étant apportés par une solution de *KCl*). Un exemple de conception d'électrodes non-polarisables (*Cu/CuSO₄*) est montré sur la figure 2.16.



(a) Conception électrodes impolarisables faites manuellement pour les expériences en laboratoire d'après T. Kremer inspiré de Ghorbani et al. (2007)



(b) Exemple d'acquisition in-situ et mise en place sur un terrain compact d'électrodes polarisables (en étain)

FIGURE 2.16 – Différents types d'électrodes (Impolarisable/Polarisables) suivant leurs utilisations

Cependant, particulièrement sur le terrain, il n'est pas tout le temps envisageable de pouvoir mettre en place des électrodes impolarisables, celles-ci étant coûteuses et moins fonctionnelles (fragiles et difficile à enfoncer sur un terrain compacté tel qu'une digue, pas d'injection possible sur les Petiots). Pour certaines des expérimentations en laboratoire, nous avons utilisé des électrodes impolarisables de type Cu/CU_{SO_4} (figure 2.16a). L'influence du type d'électrode a pu être testée lors d'essais en laboratoire ou nous avons utilisé les deux types d'électrode puis comparé les résultats. Le choix des électrodes polarisables/non-polarisables de mesures de potentiel s'est fait essentiellement selon le critère de praticabilité et de coût. Pour les expérimentations in-situ, nous avons donc fait le choix de travailler exclusivement avec des électrodes en étain inoxydable (figure 2.16b). D'après Dahlin et al. (2002), en prenant des précautions, il est possible d'envisager des prospections à l'aide de ce type d'électrodes sans que la qualité des résultats soit affectée. Pour cela à chacune de nos expériences, nous avons vérifié les résistances de contact des électrodes.

A noter que l'instrument Lippmann (utilisé pour des mesures en laboratoire et in-situ) délivre un courant constant qui doit rendre les électrodes indépendantes de tout effet de polarisation des électrodes d'injection. L'instrument à une très haute impédance d'entrée et par conséquent, les polarisations d'électrodes de réception seront pas ou peu visibles sur les mesures de polarisation provoquée. Ce constat présente des limites lorsque les contacts de prises des électrodes sont très importants ($> 100 \times 10^3 \Omega$) et/ou des effets de polarisations sont supérieurs à 0,5 V.

— *La séparation ou non des câbles*

En polarisation provoquée spectrale, l'injection et la mesure de potentiel sont simultanées. Pour s'affranchir au mieux des effets capacitifs indésirables, les câbles d'injections sont indépendants des câbles de mesures de potentiel. En polarisation provoquée temporelle, le courant d'injection est coupé lorsque l'on mesure le potentiel. Dans ce cas, les études de Dahlin et al. (2002, 2013) ont constaté que coupler les câbles ne présente pas de problème sur un site avec des résistances de contacts modérées, impliquant par conséquent des petits effets de couplage.

— *Intégration complète des créneaux "Full wave"*

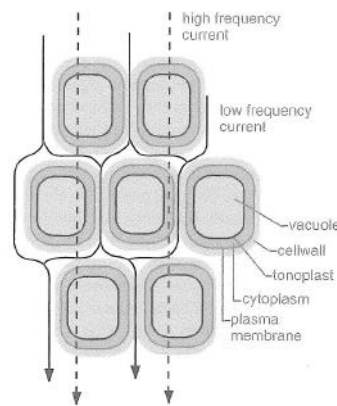
Classiquement, en polarisation provoquée temporelle, on mesure la décroissance du potentiel (réponse PP) lorsque le courant est coupé, soit sur 50% d'un cycle créneaux d'injection complet. Les développements instrumentaux récents permettent de mesurer la réponse PP lorsque le courant est actif. Dans ce cas, tout le cycle est utilisé pour connaître la réponse PP, il en résulte un nombre de répétitions (stack) plus importants et donc une augmentation du rapport signal/bruit. [Olsson et al. \(2014\)](#) reporte le succès de l'application lors de prospection in-situ.

v Polarisation des matériaux biologiques et résumé de trois travaux

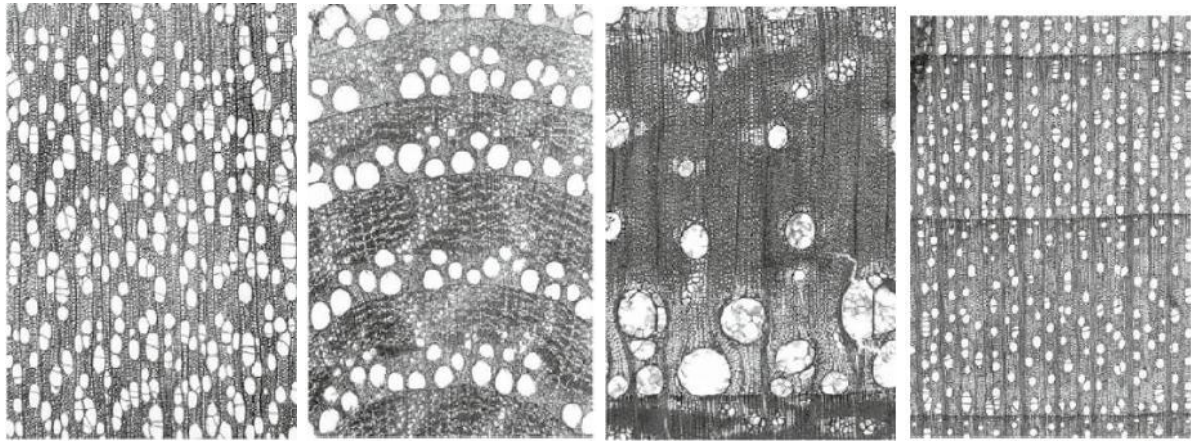
Les phénomènes de polarisation et de relaxation peuvent aussi être observés dans des matériaux organiques au passage d'un champ électrique alternatif. Selon [Repo et al. \(2005\)](#) et [Mancuso \(2011\)](#), les mécanismes de polarisation les plus importants constatés dans un système biologique de type racine sont (i) la polarisation d'interface (Maxwell-Wagner effect), (ii) la polarisation de dipôle et (iii) la polarisation Faradaic (ou de Warburg). Chacune d'entre elles a un effet à différentes gammes de fréquences (Tableau 2.2).

On s'attend à ce que les racines se polarisent plus fortement que le sol ([Vanderborgh et al., 2013](#)). Selon [Weller et al. \(2006\)](#) et [Thierry et al. \(2001\)](#), les effets de polarisation dans le bois sont causés par les différences de mobilité des ions à travers les membranes cellulaires, en particulier en fonction de la fréquence, soit à travers soit en contournant les tissus de la plante (figure 2.17). Il en résulte une séparation des porteurs de charges de différentes polarités. L'étude de [Zanetti et al. \(2011b\)](#) a confirmé lors de mesures sur des échantillons de plusieurs type de bois que la structure poreuse cause des effets de polarisations.

FIGURE 2.17 – *Diagramme schématique du passage d'un courant alternatif à travers les tissus de la plante à faibles et hautes fréquences, d'après Mancuso (2011)*



Au delà du pouvoir polarisant des racines, les mécanismes de polarisations d'un matériau biologique permettent potentiellement d'obtenir une signature spécifique nécessaire pour la discriminer du sol. Les études menées par [Martin \(2012\)](#) et [Schleifer et al. \(2002\)](#) respectivement sur des tronc d'arbres et sur des planches archéologiques, rapportent la réussite de l'application des méthodes SIP (spectral Induced Polarisation), pour lesquelles des effets de polarisation ont été observés. Ces effets ont tous été identifiés pour des fréquences en-deçà de 10^2 Hz.



(a) *Peuplier*
(*Populus nigra*) (b) *Chêne*
(*Quercus pubescens*) (c) *Robinier*
(*Robiania pseudoacacia*) (d) *Frêne*
(*Acer campestre*)

FIGURE 2.18 – Anatomie du bois de quatre espèces à l'échelle macroscopique montrant une distribution diffuse des pores pour le frêne et le peuplier, et des pores circulaires pour le chêne et le robinier selon [Schweingruber and Bosshard \(1982\)](#)

Nous détaillons ci-dessous, trois auteurs de travaux montrant l'application des méthodes de polarisation provoqué sur des matériaux de bois.

1. **Résumé des travaux de [Zanetti et al. \(2011b\)](#) : "Detection of buried tree root samples by using geoelectrical measurements : a laboratory experiment"**

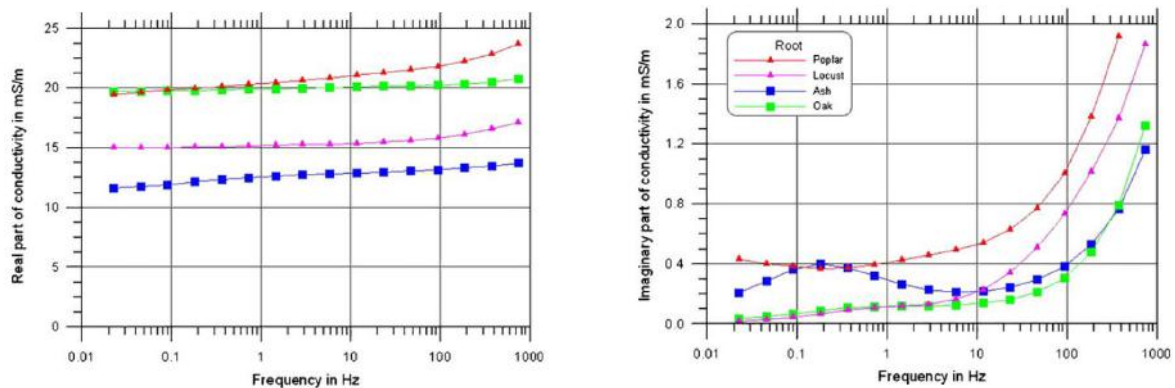
Propriétés électrique & type de sols

L'étude menée par [Zanetti et al. \(2011b\)](#) a permis de tester la possibilité de détecter des échantillons de racines (fraichement coupées) dans différents milieux (sable, graves, limons). Les signaux sont enregistrés sur des échantillons de différentes espèces, pour différentes orientations, et différentes masses de racines enfouies (Tableau 2.3). Dans la plupart des cas, les mesures montrent que la conductivité totale augmente lorsque le milieu contient un échantillon de racine enterrée. Cette tendance a été observée principalement dans le gravier et le sable. Lorsque les échantillons sont placés parallèlement aux électrodes, l'augmentation est d'autant plus forte. Le courant semble être guidé par les racines. Enfin, un effet de l'espèce semble aussi être mis en évidence [2.19](#).

D'après la figure [2.19](#), cette expérience a dans le même temps montré que la gamme de fréquences comprise entre 1 et 10 Hz contenant des effets de polarisation marqués est un bon choix pour les futures prospections. D'une part, l'investigation SIP est plus courte qu'en cas d'inclusion des basses fréquences. D'autre part, les effets de couplage électromagnétique sont négligeables.

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
	3x transversal	1.144	1.68	-	-	-	-
	longitudinal	1.406	2.125	1.144	1.718	0.785	1.111
	3x 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	1.068	1.37	1.046	1.577
	3x transversal	1.237	2.974	-	-	0.958	1.286
	longitudinal	1.503	3.701	1.224	1.683	1.064	1.106
	3x 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

Tableau 2.3 – Rapport des conductivités entre les mesures avec et les mesures sans racines enterrées pour la partie réelle et la partie imaginaire de la conductivité à 1.46Hz selon Zanetti et al. (2011b)



(a) Partie réelle de la conductivité en fonction de la fréquence

(b) Partie imaginaire de la conductivité en fonction de la fréquence

FIGURE 2.19 – Mesure de polarisation provoquée spectrale (à l'aide du SIPFUCHS III) d'échantillons racinaires de différentes espèces selon Zanetti et al. (2011b)

2. Résumé des travaux de Martin (2012) : "Complex resistivity measurements on oak"

Les travaux de Martin (2012) montrent des mesures de résistivités complexes qui ont été réalisées sur des échantillons de chêne. L'objectif est d'étudier les effets de l'anisotropie, de la teneur en eau et de l'infection par les champignons. Les résultats montrent que le bois peut être polarisé et examiné qualitativement à partir de la résistivité complexe.

Conductivité complexe & anisotropie

L'anisotropie du bois affecte non seulement la partie réelle et la partie imaginaire de la résistivité. Les effets de polarisations sont les plus forts dans la direction axiale des échantillons de bois, à une fréquence d'environ 0,01 Hz. Pour des mesures tangentielles et radiales, le pic du maximum de polarisation semble se déplacer vers des fréquences plus hautes (0,2 Hz) mais est d'amplitude bien plus faible. Les différences de σ'' sont liées aux propriétés des parois cellulaires qui sont affectées lors de la mesure probablement par des

phénomènes de polarisation de membranes. Les différences sur la partie réelle (σ'), pour les trois directions, sont dues à la structure du bois. La plupart des transports de fluide ont lieu dans la direction axiale d'où une conductivité forte, alors que dans les autres directions, le transport de fluide est beaucoup moins important, ce qui se traduit par une conductivité plus faible.

Conductivité complexe & teneur en eau de la racine

En faisant varier la teneur en eau du bois, les résultats montrent que la partie réelle et imaginaire de la conductivité se comportent de façon identiques. Comme attendu, la conductivité augmente avec l'humidité (x 100 pour $\omega\%$ variant de 20 à 100%). La phase se comporte différemment : dans un premier temps, elle augmente avec la teneur en eau puis pour $\omega \approx 50\%$ la phase commence à décroître. Cela s'explique par les différents états de saturation du bois. Dans un premier temps, les parois cellulaires du bois sont remplies d'eau liée, la saturation des fibres étant normalement atteinte entre $\omega = 28\%$ et 32% . Par la suite, les parois cellulaires (en particulier le lumen) continuent à se remplir d'eau libre, ce qui affecte de façon significative la mesure de la phase et de σ'' .

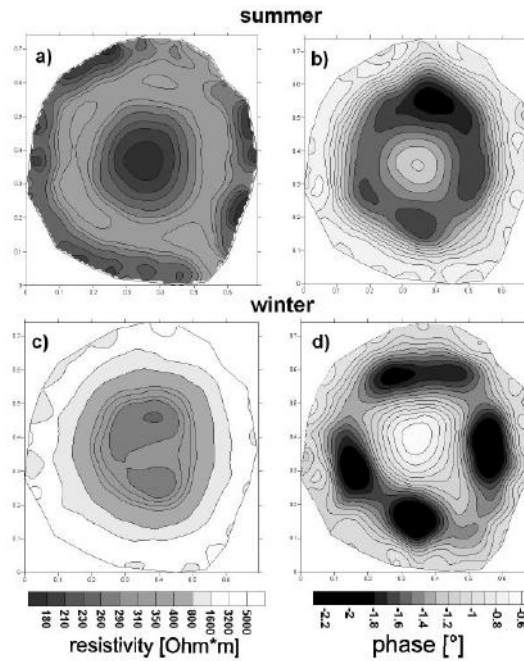
Conductivité complexe & décomposition

L'expérience sur du bois incubé de [Martin \(2009b\)](#) démontre que la modification des parois cellulaires à cause de l'infection par un champignon affecte à la fois la résistivité mais aussi la phase qui décroissent du fait de la décomposition. Dans ce cas, la résistivité décroît car la décomposition modifie la teneur en eau (qui peut aussi être causée par d'autres facteurs tels que les variations saisonnières), alors que la diminution de la phase peut être vue comme le résultat de la destruction des cellules du bois à cause de l'infection.

Conductivité complexe & effets saisonniers

Des mesures de tomographie ont été aussi réalisées sur le terrain. A cause de la corrélation entre la résistivité et la teneur en eau du bois, les variations saisonnières ont pu être clairement identifiées (figure 2.20). La variation de phase est similaire à l'évolution de la résistivité, mais d'une plus petite amplitude. Les tomographies dans le cas d'un chêne mesurées en été et en hiver sont représentées sur la figure 2.20 (à la fréquence 0,1 Hz). En été, le chêne montre une bague extérieure de faible résistivité et de faible phase. Cela correspond à la zone de l'aubier où les nutriments et les transports d'eau (flux de sève) ont lieu. La zone compacte et lignifiée constituant le duramen est caractérisée par une zone de fortes résistivité et phase. Au milieu du tronc, il existe à nouveau une zone conductrice dont l'amplitude de la phase est faible. Cela est dû au stockage de composés phénoliques conducteurs durant la lignification. En hiver, même si les tomographies conservent leurs structures en bagues, les résistivités sont bien plus grandes que celles mesurées en été. De plus, la bague correspondante à l'aubier ne peut plus être identifiée car l'arbre n'a plus de flux de sève durant la saison d'hiver. La tomographie de la phase montre seulement de petits changements car la phase n'est pas aussi sensible à la teneur en eau que la résistivité.

FIGURE 2.20 – *Mesure de polarisation provoquée spectrale (sur des arbres vivants); comparaison des résultats obtenus en été et en hiver d'après Martin (2009b)*



3. Résumé des travaux de Schleifer et al. (2002) : "Investigation of a Bronze Age plankway by spectral induced polarization"

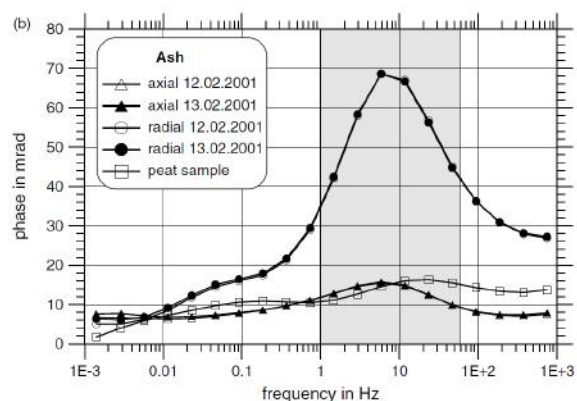
Matériel et méthode

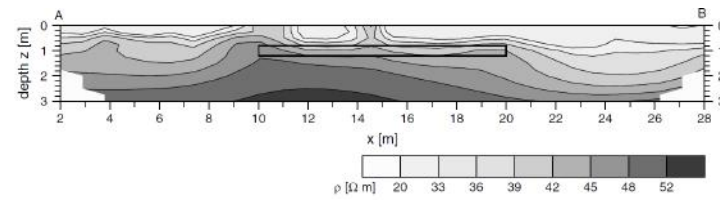
L'objectif de l'essai de terrain était de savoir si une planche archéologique située dans la tourbière pouvait être identifiée par tomographie de polarisation provoquée. L'étude présente les résultats de travaux de laboratoire sur des échantillons de bois prélevés sur la planche. Dans les deux cas, sur le terrain et en laboratoire, les mesures ont été réalisées dans le domaine fréquentiel à l'aide du SIP-Fuchs (instrument de polarisation provoquée spectrale).

Conductivité complexe & anisotropie

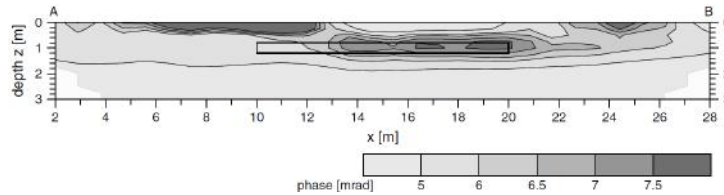
La mesure de différents d'échantillons de bois (exemple du frêne sur la figure 2.21) a confirmé que la structure poreuse du bois cause des effets de polarisation. Les valeurs de phase de l'échantillon en position axiale sont inférieures à celles de l'échantillon en position radiale.

FIGURE 2.21 – *Spectre de la phase obtenu sur des échantillons de frêne. La gamme de fréquence couverte sur les mesures de terrain est marquée par la zone grise. Tous les échantillons ont été analysés plusieurs fois pour évaluer la répétabilité (Schleifer et al., 2002)*





(a) *Modèle de résistivité*



(b) *Modèle de phase*

FIGURE 2.22 – *Résultat de l'inversion de la mesure à 4,77 Hz selon le profil parallèle à la planche archéologique. L'emplacement prévu de la planche est encadré par un rectangle (Schleifer et al., 2002)*

Limites observées sur le terrain

A partir du modèle de la résistivité la planche n'est pas visible. On remarque cependant, une résistivité plus élevée au dessous de la planche. Ceci peut s'expliquer par une compression du sol situé en dessous et donc une réduction de l'espace de pores. Le modèle de phase (figure 2.22b) montre un déphasage maximale de 10 mrad. En comparaison avec le modèle de résistivité, la position de la planche est bien déterminée, la zone de maxima de la phase coïncidant avec son emplacement.

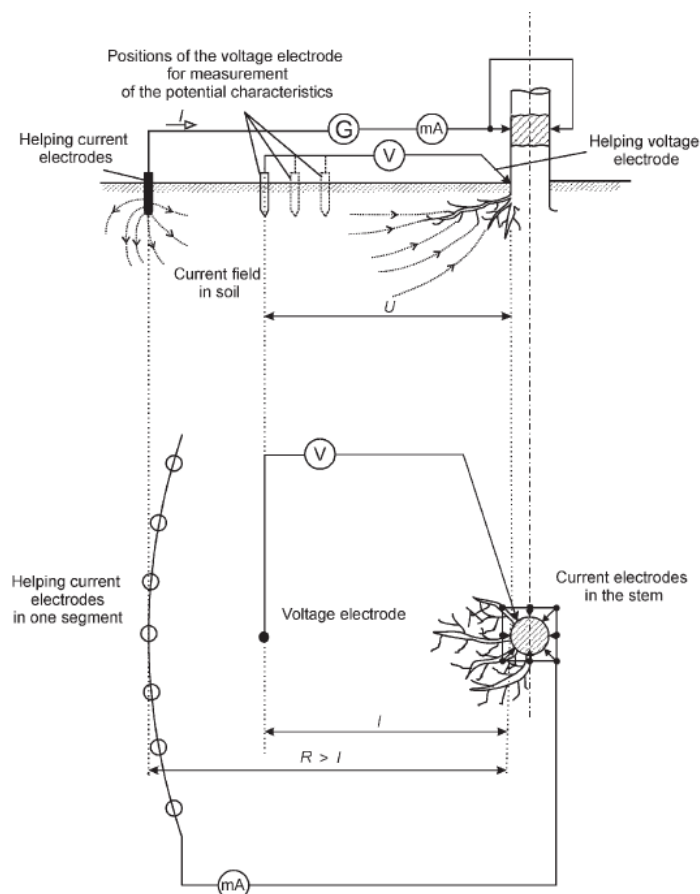
Étant donné que les planches de bois sont encastrées dans le sol et l'eau, seule une petite partie du courant pénètre dans le bois. Les déphasages mesurés résultent d'une polarisation moyenne de tous les matériaux à une certaine profondeur : le bois, le sol, la tourbe et l'eau. Il n'est donc pas surprenant que les déphasages remarquables de 50 à 70 mrad mesurés sur les échantillons de bois en position radiale en laboratoire (figure 2.21) ne puissent pas être observés sur le terrain.

Cas particulier de la polarisation provoquée à une fréquence : mesure de capacité

En plus des trois références analysées précédemment, le cas particulier de la polarisation provoquée à une fréquence est étudié.

Lorsque l'on fixe la fréquence d'injection, on fait une mesure de la capacité électrique du milieu. C'est le cas lors d'acquisition en polarisation provoquée temporelle. De nombreuses études font part de l'utilisation de mesures de capacité des systèmes racinaires avec la spécificité d'implanter des électrodes de potentiel et d'injection directement dans le tronc, les deux autres dans le sol à différentes distances du tronc (figure 2.23). Sur le même principe que la polarisation provoquée, la méthode de mesure de capacité électrique repose sur la polarisation liée aux membranes du bois des racines lorsqu'une source d'énergie électrique extérieure est appliquée et mesure les propriétés de conductivité complexe du système racinaire. Cette méthode s'applique aussi bien sur des arbres ligneux que sur des petites espèces avec des racines fines. Preston et al. (2004) utilisent cette méthode pour estimer la masse racine de peupliers. Une forte corrélation ($r^2 = 0.895, P \leq 0.001$) a été obtenue entre la masse racinaire (aussi bien humide, qu'après séchage) et la valeur de la capacité électrique.

FIGURE 2.23 – Vue schématique du dispositif expérimental pour la mesure de la surface d'absorption racinaire. Abréviations : G = Alimentation basse fréquence ; mA = Ampèremètre ; I = courant ; U = voltage ; R = rayon de la sphère et V = voltmètre. (Aubrecht et al., 2006)



Les résultats obtenus par Aulen and Shipley (2012) sur des espèces herbacées sont moins tranchés puisque le coefficient de corrélation ($r^2 = 0.30$) était significatif mais trop faible pour établir une relation entre la masse racinaire sèche et la capacité électrique mesurée. Cela s'explique par le fait que les interactions racinaires ont un effet sur la réponse et la mesure de la capacité et que les espèces à racines fines majoritaires sont plus affectées.

Cette méthodologie permet d'estimer la masse racinaire et semble sensible à certains traits morphologiques du système racinaire. Cependant il semble compliqué de connaître avec précision la position de racines isolées, leurs tailles, leur profondeur et leur extension. Cette information est pourtant indispensable afin de bien appréhender le comportement dangereux des systèmes racinaires. De plus, certaines études démontrent le rôle important que joue le placement de l'électrode sur le tronc près de la racine primaire pour réduire les effets du tronc sur le circuit. En laboratoire, il a été trouvé que la résistance dépend fortement du contact à la base de l'arbre (ici du saule), causant un fort biais sur l'évaluation de la surface des racines. On privilégiera donc une approche basée sur la tomographie à quatre électrodes implantées dans le sol.

vi Les modèles associés à la réponse PP

Plusieurs polarisations ont lieu et ne peuvent être décrites en utilisant un modèle simple. Lorsque plusieurs processus de relaxation ont lieu simultanément, la réponse électrique totale est caractérisée par une distribution des temps de relaxation (Angersbach et al., 2002). L'utilisation de modèles empiriques est en général la première approche mise en œuvre pour reproduire les phénomènes physiques. Cette section décrit les modèles les plus fréquemment utilisés pour la représentation mathématique des signaux de polarisation provoquée spectrale. Ils existent et ont un équivalent dans le domaine temporel.

Modèle Cole-Cole

Le modèle de Cole-Cole (Cole and Cole, 1941) est une extension du modèle de Debye (Debye, 1929) et permet de modéliser la relaxation d'un milieu homogène. Il est fréquemment utilisé dans le domaine de la Polarisation Provoquée, a fortiori pour la PPS. Ce modèle utilise les paramètres de résistivité complexe selon la forme :

$$\rho^*(\omega) = \rho_0 \left[1 - m \left(\frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right] \quad (2.17)$$

- ρ_0 , résistivité électrique en courant continu ($\Omega \text{ m}$) (i.e., $\rho \mapsto \rho_0$ quand $\omega \mapsto 0$) ;
- m , chargeabilité intrinsèque (sans dimension), liée à la concentration des particules polarisables ;
- τ , constante de temps caractéristique de la relaxation (s), liée à la taille des grains polarisables ;
- c , constante de relaxation, liée à la distribution de taille des grains polarisables.

Les quatre paramètres déduits à partir du modèle de Cole-Cole peuvent être utilisés pour synthétiser l'information du spectre afin de proposer une comparaison et une interprétation des résultats.

Le modèle de Dalton

Dalton (1995) analyse le circuit racine-sol et propose un modèle conceptuel composé de plusieurs résistances et capacités représentant différentes parties du circuit (figure 2.24). Dans ce modèle, la solution interne (xylème et phloème) des racines de la plante forme un conduit de faible résistance qui est séparé d'une faible résistance externe (sol et nutriments) par l'intermédiaire de membranes isolantes. Dans cette analogie, l'interface entre la surface racinaire et le substrat a une capacité proportionnelle à la charge accumulée sur la surface de la membrane séparant la sève du xylème du sol. La capacité électrique d'une racine selon Dalton est la somme de capacités connectées en parallèles. Ce modèle est à la base de nombreuses interprétations d'études expérimentales (Preston et al., 2004; Ozier-Lafontaine and Bajazet, 2005).

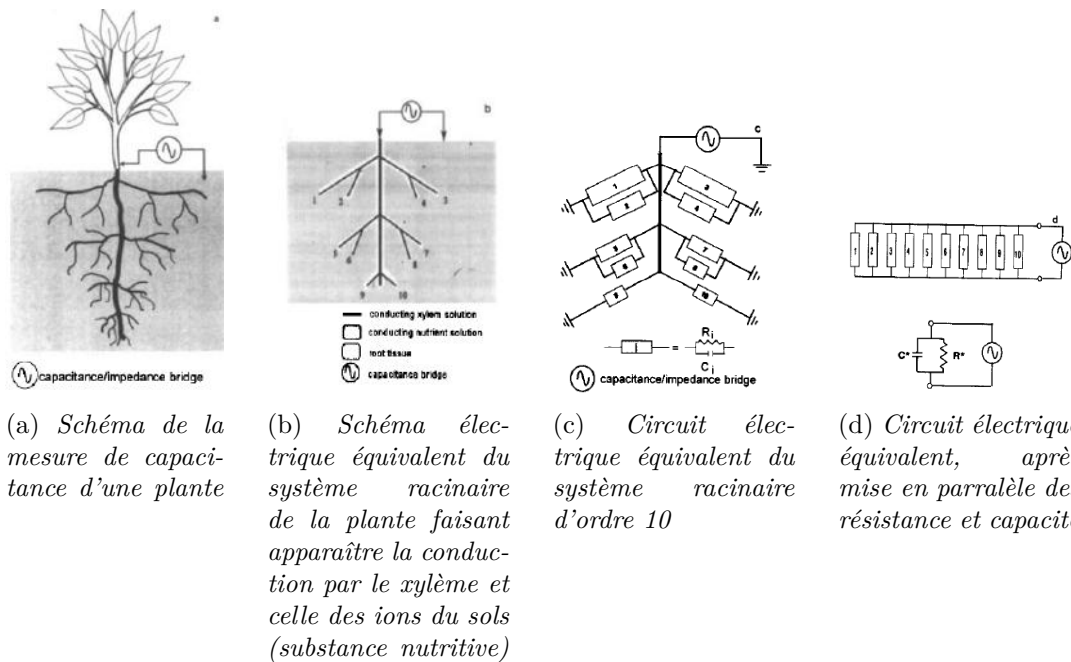


FIGURE 2.24 – Modèle conceptuel d'un circuit racine-sol selon Dalton (1995)

2.2.d Méthodes d'inversions des données électriques

On distingue deux catégories de mesures, les mesures directes (longueur, masse) et les mesures indirectes comme la teneur en eau ou la résistivité. Dans le cas de mesures de tomographie de résistivité électrique, la réalité est non accessible, on a donc recours à un modèle équivalent. A un modèle correspond une donnée, mais à une donnée correspond différents modèles ou aucun modèle. Le schéma 2.25 représente les navettes possibles entre l'espace des données (ou mesures) et l'espace des modèles. Le problème direct, ou la simulation de données, est l'opération qui permet le passage de l'espace des modèles vers l'espace des données. Dans l'autre sens, des données vers le modèle il s'agit de l'opération d'inversion des données (Tarantola, 2005).

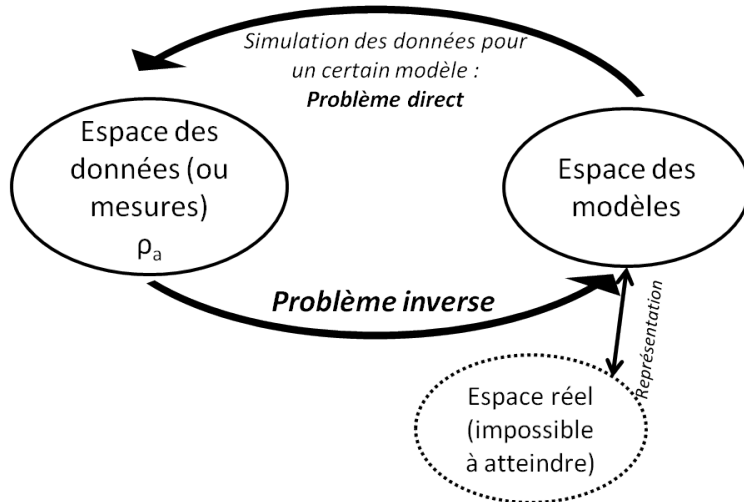


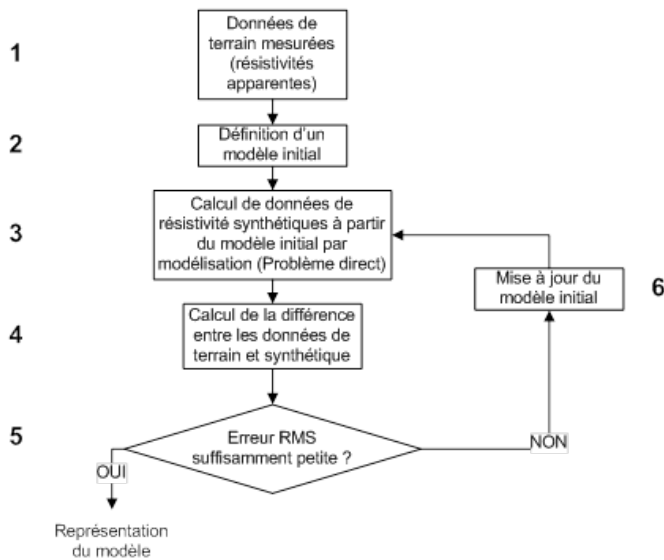
FIGURE 2.25 – Schématisation du principe des méthodes inverses

Il existe plusieurs codes d'inversion des données, plus ou moins robustes, commerciaux ou open source ayant chacun des avantages et inconvénients : le logiciel d'inversion Res2DInv© (Geotomo Software), AarhusInv© (Aarhus University- Hydrogeophysics Group) et DC2DInvRes© (Thomas Günther, RESISTIVITY.NET productions).

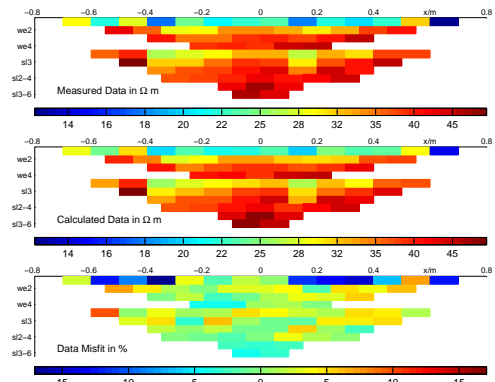
i Classique

Le processus d'inversion dit classique est décrit par la figure 2.26a, où à partir des données de résistivité apparentes de terrain, on obtient une représentation de la réalité par un modèle Tarantola and Valette (1982).

Le volume investigué est discrétisé en mailles (ou blocs) dont la taille est définie en fonction le type d'acquisition (Wenner, Schlumberger, Dipôle-Dipôle...), ce qui correspond à la résolution verticale du dispositif. Une valeur de résistivité apparente est attribuée à chaque maille. Cette étape permet de définir le modèle initial. Puis à partir de ce modèle initial, les données synthétiques sont calculées par modélisation (problème direct). La section modélisée est comparée avec les données de terrain mesurées. Une fonction coût, correspondant à l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs modélisées est minimisée de manière itérative (exemple par optimisation par moindres carrés généralisés) en redéfinissant le modèle initial. Lorsque l'erreur est suffisamment petite, le modèle finale est représenté.



(a) Schématisation du principe de l'inversion ; mise en évidence du processus itératif de minimisation menant à proposer le modèle final



(b) Exemple d'inversion des données de résistivité de terrain (données IRSTEA) à partir du logiciel DC2DInvRes© ; du haut vers le bas : données mesurées (étape 1), données calculées (étape 3) et erreur RMS (étape 5)

FIGURE 2.26 – Organigramme du processus d'inversion et exemple sur des données expérimentales

ii Méthodes alternatives

A une donnée correspond différents modèles (figure 2.25). Les méthodes alternatives d'inversions (avec modèle initial, time-lapse ou encore conjointe) présentées ci-dessous ont toutes pour objectif de réduire l'espace des modèles possibles. On cherche en général à contraindre au mieux le modèle initial.

— Avec modèle initial ou contraintes physiques

Le modèle initial peut soit être homogène ou bien construit à partir de connaissances ou idées acquises au préalable. Les connaissances a priori peuvent être issues pour le sol de sondages géotechniques situés à proximité (Jackson, 1979).

— Inversion time-lapse

L'inversion time-lapse est intéressante lorsque l'on étudie un processus variable dans le temps (Loke, 1999), typiquement, des systèmes racinaires avec leurs environnement. Dans ce cas, le modèle initial tient compte des modèles précédant.

— Inversion conjointe IP

Les données collectées lors de prospections en polarisation provoquée (PPT) contiennent deux séries : la résistivité apparente et une série de données de chargeabilités apparentes. Par conséquent, le nombre de points est doublé par rapport à une prospection de résistivité classique. Dans ce cas, il y a deux méthodes d'inversion possibles : (i) immédiatement après une itération de l'inversion des données de résistivité, une itération des données chargeabilités est réalisée (c'est une inversion simultanée); (ii) l'inversion des données de chargeabilité est réalisée seulement à la fin de l'inversion de la résistivité. Dans ce cas, seul le modèle obtenu à la dernière itération de résistivité est utilisé (ou

parfois même, l'inversion est complètement indépendante).

— *Inversion conjointe généralisée*

L'inversion conjointe généralisée permet de réduire l'incertitude des modèles trouvés en proposant un modèle unique, obtenu en combinant les mesures basées sur des phénomènes physiques sans relation analytique (Karaoulis et al., 2012). D'après les conclusions formulées sur l'intérêt d'un couplage des méthodes électrique et acoustique cette méthode d'inversion serait intéressante.

2.2.e Synthèse des méthodes géoélectriques pour la détection de racines et voies d'améliorations possibles

D'après l'étude bibliographique menée, il apparaît intéressant de mesurer les effets de polarisation comme paramètre supplémentaire pour la détection de systèmes racinaires implantés dans les digues. Cependant, certaines voies d'améliorations doivent être envisagées afin de lever certains verrous.

Tout comme pour la méthode de résistivité où un problème de recouvrement des gammes de résistivité électrique est observé empêchant la discrimination sans ambiguïté sol/racine, les phénomènes de polarisations des sols et des racines se superposent. L'étude complète du spectre de conductivité complexe semble pouvoir être une bonne approche pour les différencier. Cependant le modèle de type Cole-Cole généralisé décrivant la superposition des polarisations des racines et du sol est difficile à mettre en œuvre.

Une voie d'amélioration est dans un premier temps de différencier les contributions des différents matériaux (racine ou sol) par l'étude de la fréquence de relaxation f_R , c'est-à-dire la fréquence pour laquelle les effets de polarisation sont les plus forts, et à partir de l'amplitude de cette fréquence A_{f_R} . L'identification de ces paramètres en fonction des variables expérimentales (intrinsèque à la racine ou d'origine externe) est actuellement méconnue et demande à être vérifiée dans le cadre d'un système racinaire dans son environnement. C'est l'objet du premier point de discussion ci-dessous. De plus, une bonne connaissance de f_R et A_{f_R} permettrait aussi d'envisager d'exporter plus facilement la méthode PPT in-situ en fixant une fréquence d'injection adaptée pour exciter au mieux la racine. C'est l'objet de la discussion du second point.

Amélioration 1 : valider et établir des relations sur la dépendance en fréquence des matériaux biologiques de type racines en utilisant la polarisation provoquée spectrale et temporelle

— *Une meilleure compréhension des paramètres intrinsèques*

A l'aide de dispositifs simples construits au sein de notre laboratoire, il serait intéressant dans un premier temps de retrouver les résultats connus de la littérature sur des échantillons de bois à savoir : (i) montrer des effets de polarisation situés à basses fréquences, (ii) identifier les variations de fréquences caractéristiques en fonction des paramètres intrinsèques de la racine (teneur en eau, décomposition, anisotropie). Pour aller plus loin, il serait pertinent de déterminer une loi empirique reliant la masse racinaire enfouie et l'amplitude de la polarisation mesurée. En même temps, on pourrait déterminer les limites de résolution en termes de proportion racine/sol intégrée par la mesure, par rapport à l'amplitude de la polarisation mesurable. A titre d'exemple, selon Schleifer et al. (2002), le contraste observé entre une planche archéologique et le sol

environnant est d'environ 2 mrad de différences.

— *Une meilleure compréhension et utilisation des variables externes*

Comme nous l'avons évoqué, la mesure de la conductivité complexe est le résultat de l'état et de l'évolution des paramètres de sols, des racines mais aussi de l'interaction avec l'environnement. Nous n'avons pas trouvé à ce jour d'étude qui applique les méthodes de polarisation à l'étude d'espèces ligneuses pour la cartographie de racines.

Pour le domaine des basses fréquences, l'influence de la teneur en eau sur les propriétés complexes σ^* et ρ^* n'est pas encore bien caractérisée. Ceci tient à l'existence de trop peu de données expérimentales (Razafindratsima et al., 2003). Il serait intéressant d'étudier l'état de teneur en eau de sol pour lequel les racines étaient les plus visibles par méthode PP. A l'aide d'essais en laboratoire, nous aimerions établir une relation reliant la fréquence f_R , la teneur en eau des sols Θ , l'amplitude de la polarisation A_{f_R} . Ce triplet $(f_R; \Theta; A_{f_R})$ pourrait aussi être étudié lors d'acquisition en monitoring in-situ intégrant les effets d'absorption de l'arbre.

Amélioration 2 : faciliter l'export in-situ en développant l'acquisition en polarisation provoquée temporelle

Par comparaison avec la méthode conventionnelle de tomographie de résistivité, la polarisation provoquée, particulièrement spectrale (PPS), est une méthode lente et couteuse. Néanmoins, l'instrumentation de polarisation provoquée temporelle est moins contraignante à la mise en place in-situ. La grande majorité des études d'investigation de matériaux de type bois menées en laboratoire et in-situ utilise la polarisation provoquée spectrale comme méthode d'identification d'anomalie de résistivité complexe ρ^* . La PPT implique le choix d'une fréquence d'injection. Celle-ci est liée à la fréquence f_R pour laquelle les effets de polarisation sont maximum et doit être judicieusement choisie sachant les conditions de mesures d'après les relations établies en laboratoire ou en milieu semi-contrôlé.

2.3 Les méthodes acoustiques

Nombreux sont les ouvrages scientifiques décrivant le formalisme des méthodes acoustiques et de la propagation des ondes, que ce soit dans le domaine de la sismologie (Aki and Richards, 1980), de la géophysique appliquée (Sheriff and Geldart, 1995) ou de l'ingénierie géotechnique (Richart et al., 1970). Dans un premier temps, nous présentons des rappels théoriques sur la génération et la propagation d'une onde dans un sol permettant de retrouver l'origine des différentes quantités physiques, avec un intérêt particulier à la vitesse de propagation, mesurées au cours de nos expérimentations en laboratoire et in-situ. La théorie développée permet aussi d'identifier la nature (type d'onde) et le comportement des ondes potentielles dans le cadre de mesure de tomographie acoustique. Quelques aspects pratiques de méthodologie seront discutés au sujet de la méthode proposée par RINNTECH. Enfin nous introduisons quelques notions de traitements des signaux en mettant l'accent sur la transformée en ondelettes qui pourrait être utilisée pour la discrimination de la racine dans un sol.

2.3.a Rappels sur la propagation des ondes acoustiques

Les ondes acoustiques de l'infrason aux ultrasons sont des perturbations d'un milieu déformable (fluide ou solide) se propageant de proche en proche dans celui-ci par les actions des particules élémentaires sur leurs voisines. Ces ondes n'existent pas dans le vide car il n'y a pas de support matériel à la propagation (Bruneau and Dixneuf, 2006). Les sons audibles (ou acoustiques) sont des ondes élastiques dont la fréquence est comprise entre environ 10 Hz et 20 kHz (Tableau 2.4). Les ultrasons ont des fréquences supérieures à celles des sons audibles par l'oreille humaine et inférieures aux fréquences de vibration thermique des atomes (environ 1 GHz).

Infrasons	Sons audibles	Ultrasons	Hypersons
0-20 Hz	20 Hz-20 kHz	20 kHz-1 GHz	>1GHz

Tableau 2.4 – Échelle en fréquence des ondes acoustiques

i Ondes élastiques dans les milieux infinis : ondes de volumes

Afin de décrire la propagation d'une perturbation, on utilise la loi de Newton (ou l'équation fondamentale du mouvement) qui définit l'accélération γ d'un corps de densité ρ qui subit la résultante de forces extérieures F .

$$\vec{F} = \rho\gamma \quad (2.18)$$

L'état mécanique d'un solide élastique est défini par les relations entre les efforts internes et les déformations locales en chaque point ou particule du solide. La théorie de l'élasticité suppose que pour de petits déplacements, les déformations et les contraintes sont proportionnelles. L'équation fondamentale du mouvement (résultante et moment dynamique) applicable au cas des petites déformations s'écrit :

$$\vec{F} = \vec{\nabla}(\sigma\vec{n}) + \vec{f} = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \quad (2.19)$$

- $\vec{\nabla}$ opérateur gradient ;
- \vec{u} vecteur déplacement ;
- σ tenseur des contraintes ;
- \vec{f} , forces extérieures ;
- ρ , masse volumique.

En pratique, les coefficients de Lamé λ et le second μ (appelé module de cisaillement) sont utilisés pour décrire les propriétés élastiques des matériaux. Pour un milieu isotrope, on a les relations suivantes liant les contraintes aux coefficients de Lamé :

$$\text{Contraintes normales : } \sigma_{ii} = \lambda \Delta + 2\mu\epsilon_{ii} \text{ avec } \Delta = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} \quad (2.20)$$

$$\text{Contraintes tangentielles : } \sigma_{ij} = \mu\epsilon_{ij} \text{ avec } i, j = x, y, z \text{ et } i \neq j \quad (2.21)$$

En tenant compte de la loi de Hooke et en combinant les équations 2.21 avec l'équation fondamentale du mouvement 2.19, on obtient la relation vectorielle :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) + \mu \vec{\Delta} \vec{u} \quad (2.22)$$

Selon le théorème de Helmholtz, deux familles de solutions mathématiques peuvent décrire le champ de déplacement total des particules : un potentiel scalaire de dilatation ϕ et un potentiel vectoriel de distorsion Φ :

$$\text{Potentiel scalaire de dilatation-compression : } \phi = \vec{\nabla} \cdot \vec{u} \quad (2.23)$$

$$\text{Potentiel vectoriel de distorsion : } \vec{\Phi} = \vec{\nabla} \times \vec{u} \quad (2.24)$$

L'équation obtenue en considérant le potentiel de dilatation, correspondant aux mouvements de compression-dilatation (ondes P) s'écrit :

$$\frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \nabla^2 \phi \text{ avec } \alpha^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \quad (2.25)$$

L'équation obtenue en considérant le potentiel vectoriel de distorsion, correspondant aux mouvements de cisaillement (ondes S), qui peuvent se produire dans le plan horizontal (ondes SH) ou dans le plan vertical (ondes SV) s'écrit :

$$\frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = \nabla^2 \Phi \text{ avec } \beta^2 = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.26)$$

On s'intéresse aux solutions des équations 2.25 et 2.26 pour des ondes planes progressives harmoniques. Une onde sphérique ou cylindrique peut être considérée comme plane à une distance suffisamment éloignée de la source. La solution s'écrit dans ce cas :

$$\Phi(x, t) = A \cos(2\pi k(x + Vt)) \quad (2.27)$$

- k nombre d'ondes ;
- λ , longueur d'onde ;
- V , vitesse de propagation.

On obtient les vitesses de propagation des ondes P et S suivantes, après résolution des équations 2.25 et 2.26 par une onde plane progressive harmonique :

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.28)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.29)$$

Les ondes élastiques dans un milieu infini sont communément appelées ondes de volume. L'excitation mécanique, dans un milieu isotrope, provoque donc deux principaux types de déplacement : (i) des variations de volume (compression-dilatation) longitudinales (c'est-à-dire parallèles à la direction de propagation, figure 2.27a) et (ii) des mouvements de cisaillement transversaux (c'est-à-dire perpendiculaires à la direction de propagation, figure 2.27b).

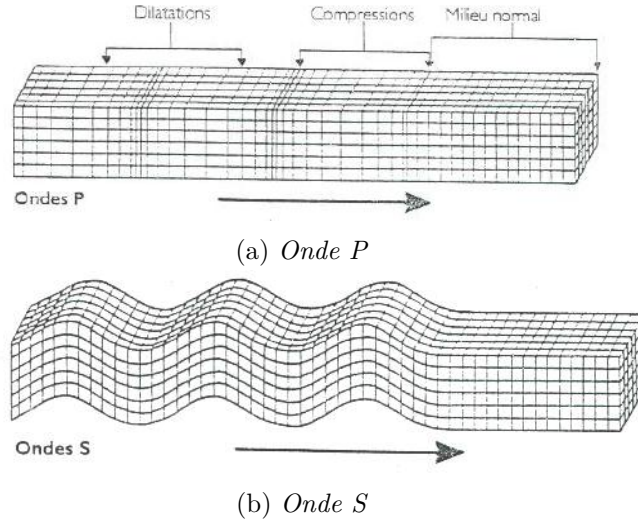


FIGURE 2.27 – Ondes de volume. Modifié d'après Bolt (1976)

Propagation dans un matériau anisotrope : exemple du bois

Le bois est un matériau fortement anisotrope : ses propriétés varient suivant les directions longitudinale (L), radiale (R) et transversale (T) représentées sur la figure 2.28. Pour mettre en évidence ces propriétés d'anisotropie, on choisit d'exprimer la loi de Hooke généralisée sous sa forme matricielle, de même pour la matrice de relation entre vecteur déplacement et vecteur déformation.

$$\vec{\sigma} = [C][M]\vec{u} \quad (2.30)$$

- \vec{u} est le vecteur déplacement ;
- $[C]$ la matrice de rigidité ;
- $[M]$ la matrice de relation entre vecteur déplacement et vecteur déformation.

En coordonnées cartésiennes et pour un matériau orthotrope, l'équation 2.30 devient :

$$\left(\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \begin{bmatrix} (c_{11} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + c_{44} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + c_{66} \frac{\partial^2}{\partial z^2}) & (c_{12} + c_{44}) \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} & (c_{13} + c_{66}) \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial z} \\ (c_{12} + c_{44}) \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} & (c_{22} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + c_{44} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + c_{55} \frac{\partial^2}{\partial z^2}) & (c_{23} + c_{55}) \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial z} \\ (c_{13} + c_{66}) \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} & (c_{23} + c_{55}) \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial z} & (c_{33} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + c_{66} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + c_{55} \frac{\partial^2}{\partial z^2}) \end{bmatrix} \right) \vec{u} = \vec{0}$$

Pour une propagation dans la direction x , le vecteur déplacement n'est fonction que de x , le système d'équation précédent devient :

$$\left(\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \begin{bmatrix} c_{11} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \\ c_{44} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \\ c_{66} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \end{bmatrix} \right) \vec{u} = \vec{0}$$

On retrouve l'équation de d'Alembert pour chacune des composantes de \vec{u} avec des vitesses de propagation respectives $\sqrt{c_{11}/\rho}$ dans le cas d'une onde longitudinale et $\sqrt{c_{44}/\rho}$, $\sqrt{c_{66}/\rho}$ dans le cas des deux ondes transversales.

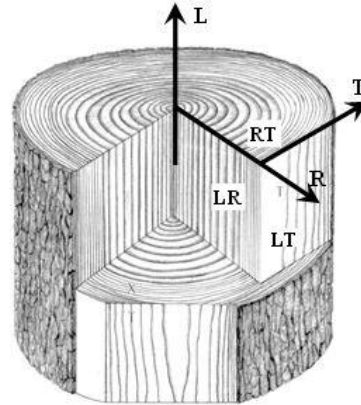


FIGURE 2.28 – Plans d'anisotropie du bois selon [Blanchet et al. \(2005\)](#), L : Longitudinale, R : Radiale, T : Transversale

Il y a alors propagation de trois types d'onde, pour un matériau anisotrope, dont la polarisation n'est plus ni parallèle, ni perpendiculaire à la direction de propagation. L'onde dont la direction de polarisation est la plus proche de la direction de propagation prend le nom d'onde quasi longitudinale QL et les deux autres, d'ondes quasi transversales QT ([Royer and Dieulesaint, 2001](#); [Lefebvre, 1985](#)).

ii Ondes élastiques dans les milieux bornés

En réalité, les solides sont bornés et les solutions doivent satisfaire des conditions aux limites. Dans ce cas, en plus des ondes de volume (cas des milieux infinis), d'autres ondes apparaissent. Les ondes de surface sont des ondes pour lesquelles l'énergie acoustique se propage le long des interfaces d'un milieu, soit une interface air-solide, soit solide-solide ou encore fluide.

Ces ondes comprennent donc les ondes d'interfaces, telles les ondes de Stoneley (solide-solide interface), les ondes guidées à la surface d'un solide telles les ondes de Lamb, ainsi que les ondes de surfaces telles que l'onde de Love ou de Rayleigh. L'onde de Love (figure 2.29a) est issue d'interférences entre des ondes S, alors que l'onde de Rayleigh (figure 2.29b) se propage, issue des interférences constructives entre les ondes P et SV. Lorsqu'un solide est limité par deux plans parallèles, les ondes de Rayleigh se propagent indépendamment sur chacun des plans tant que leur distance est grande devant la longueur d'onde. Quand l'épaisseur du solide devient de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, les composantes des ondes de surface se couplent et donnent naissance à des ondes de Lamb symétriques ou antisymétriques ([Royer and Dieulesaint, 2001](#)).

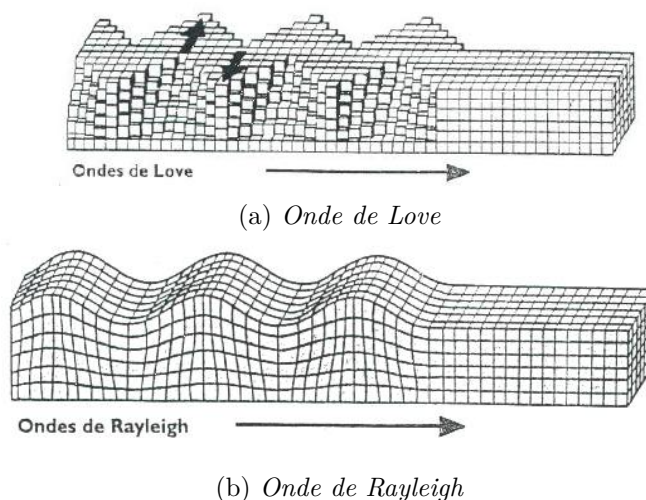


FIGURE 2.29 – Ondes de surface. Modifié d'après Bolt (1976)

Notion de guide d'onde

Nous avons présenté la propagation d'ondes élastiques dans un milieu ouvert (infini), puis le cas où l'énergie acoustique est au contraire confinée dans des milieux bornés. Les ondes sont guidées dès lors qu'elles sont contraintes par des conditions aux limites (Rayleigh, 1896). On peut montrer une analogie dans le cas de la propagation le long d'une racine enterrée connectée au tronc de l'arbre où le milieu de propagation dans ce cas est borné. Les modes de propagation, c'est-à-dire l'état d'une onde stationnaire, associés à ces ondes sont déterminés par le comportement acoustique des matériaux.

La définition d'un guide d'onde en terme de géométrie de propagation est précisée dans le paragraphe v.

iii Effets du milieu sur la propagation des ondes

À l'instar de la lumière, au cours de leur propagation dans un milieu borné, les ondes sont dispersées, atténuées et réfléchies aux extrémités.

Réflexion et réfraction

La réflexion et la réfraction sont des phénomènes connus en physique des ondes et sont décrits par la loi de Snell-Descartes. Lorsqu'une onde progressive se propage sous incidence oblique depuis la surface dans un milieu 1 (à la vitesse V_1) et rencontre un milieu 2 (de vitesse V_2) avec un angle d'incidence θ_i (par rapport à la perpendiculaire au plan de l'interface entre les deux milieux) alors : une partie de l'énergie est réfléchie vers la surface avec un angle égal à θ_r , le reste de l'énergie est réfracté dans le milieu 2 avec un angle θ_t (figure 2.31) selon la loi de Snell-Descartes tel que :

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.31)$$

Quand θ_i est égal à l'angle critique θ_c , θ_t est égal à 90° . L'onde réfractée se propage alors le long de l'interface à la vitesse V_2 dans les deux milieux, entraînant la formation d'une onde conique qui remonte à la surface à la vitesse V_1 et avec un angle d'émergence égal à θ_c en tout point de l'interface (figure 2.31). À partir d'une certaine distance à la source (liée à l'épaisseur

du milieu 1 et aux vitesses V_1 et V_2), l'onde conique émergente arrive en surface avant l'onde directe se propageant le long de la surface dans le milieu 1. Enfin, lorsque θ_i est supérieur à l'angle critique θ_c , la loi de Snell-Descartes n'est plus satisfaite, une partie de l'énergie est réfléchie alors qu'une autre onde est piégée le long de l'interface (Brekhovskikh, 2012; Saracco et al., 1987, 1991).

Impédance acoustique

L'impédance acoustique Z d'un milieu pour une onde acoustique caractérise la résistance du milieu au passage de cette onde et est définie par la relation :

$$Z = \rho V \quad (2.32)$$

Finalement, le produit ρV a une signification acoustique importante car l'impédance acoustique (Z) permet d'évaluer la part de l'onde réfléchie (ou transmise) en déterminant le coefficient de réflexion R (ou de transmission T) qui dépend des impédances spécifiques de chacun des milieux et de l'angle d'incidence selon la relation suivante :

$$R = \frac{Z_2/Z_1 - \cos \theta_t / \cos \theta_i}{Z_2/Z_1 + \cos \theta_t / \cos \theta_i} \quad (2.33)$$

$$T = 1 - R \quad (2.34)$$

Les impédances acoustiques Z caractéristiques de différentes natures de matériaux sont résumées dans le tableau 2.5. L'impédance du bois située entre $0,6 \times 10^6$ et $2,5 \times 10^6$ selon la direction de propagation de l'onde est dans la plupart des cas inférieure à l'impédance acoustique des sols. Les densités et vitesses de ces sols ont été déterminées par Orsi and Dunn (1991) à partir de mesure sur des sédiments marins et repris dans l'étude de Arnott et al. (2005) afin de déterminer les coefficients théoriques de réflexion d'une planche archéologique.

De même, lors de la génération d'une onde en surface, à l'aplomb d'une racine, l'énergie sera à la fois réfléchie par celle-ci mais aussi une partie lui sera transmise. Le figure 2.31 résume l'ensemble des effets du milieu sur la propagation des ondes en considérant deux milieux (racine et sol) d'impédance différentes. Considérer l'impédance acoustique est une approche intéressante pour connaître la quantité d'énergie transmise à travers l'anomalie suivant le contraste d'impédance existant et pourra être reprise pour approximer la transmission de l'onde dans le sol et vers la racine.

Atténuation et dispersion

Dans un milieu hétérogène, un signal qui se propage perd de l'amplitude au cours de son trajet et s'étale dans le temps (figure 2.30). Ce sont les manifestations respectivement de l'atténuation et de la dispersion du signal.

$$\text{Considérons une onde plane de la forme : } u(x, t) = e^{ikx} e^{-i\omega t} \quad (2.35)$$

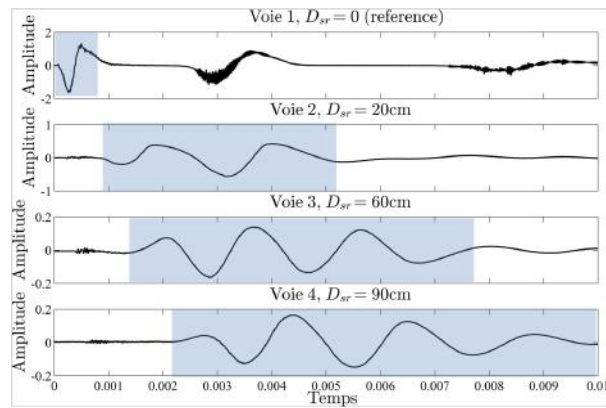
Pour un milieu hétérogène, le nombre d'onde complexe (k) fait apparaître les paramètres d'atténuation $\alpha(\omega)$ et de dispersion $\nu(\omega)$ sous la forme suivante :

$$k = \frac{\omega}{\nu(\omega)} + i\alpha(\omega) \quad (2.36)$$

Matériau	Masse volumique (kg/m ³)	Vitesse de propagation (m/s)	Impédance acoustique (N s/m ³)
Air (à 20 ° C)	1,2	340	410
Eau	1000	1500	$1,5 \times 10^6$
Acier	8000	5100	40×10^6
Verre	2500	5300	13×10^6
Béton	2200	4000	9×10^6
Bois (sens longitudinal)	500	5000	$2,5 \times 10^6$
Bois (sens tangentiel)	500	1400	$0,7 \times 10^6$
Bois (sens radial)	500	1100	$0,6 \times 10^6$
Sable (*)	2100	1734	$3,6 \times 10^6$
Sable-Limon-Argile (*)	1740	1575	$2,7 \times 10^6$
Argile (*)	1450	1496	$2,2 \times 10^6$

Tableau 2.5 – *Ordre de grandeur des propriétés acoustiques de matériaux usuels inspiré de Brancheriau HDR et Arnott et al. (2005) (*) ; aucune fréquence de mesure n'est précisée (pour la mesure sur les milieux hétérogènes)*

FIGURE 2.30 – *Exemple de la propagation dans un sol limoneux d'un paquet d'ondes produit par un signal impulsionnel (au marteau) - Mise en évidence 1/ de l'extension de l'enveloppe du paquet d'ondes c'est-à-dire que le milieu est dispersif - 2/ du phénomène d'atténuation (diminution de l'amplitude sur l'échelle des ordonnées) ; signaux acquis lors de mesure de terrain avec le dispositif présenté sur la figure 2.33*



La perte d'amplitude est d'abord liée à une perte d'énergie géométrique lors de l'élargissement du front d'onde (divergence géométrique) en $1/\sqrt{r}$. D'autre part, on distingue l'atténuation intrinsèque pour décrire la propagation dans les milieux visco-élastiques causant par exemple des conversions de chaleurs (atténuation due à l'interaction entre l'onde et le milieu poreux) de l'atténuation par les hétérogénéités liées à l'interaction entre l'onde et les interfaces (Peyras et al., 2015), comme lors du phénomène de diffraction (Damaj, 2006).

Un milieu de propagation est qualifié de dispersif si la vitesse de phase est fonction de la fréquence (ou de la longueur d'onde), ce qui est le cas pour tous les milieux atténuants. Cela signifie que les différentes fréquences contenues dans le signal ne se propagent pas à la même vitesse. Dans un régime de propagation linéaire (faibles perturbations), la vitesse acoustique est une caractéristique du milieu. L'étude des effets de dispersion de la vitesse est particulièrement intéressante en présence des ondes de surface et des ondes guidées.

iv Paramètres influençant les mesures d'atténuation et de vitesse

Nous décrivons trois paramètres que l'on estime prépondérants sur l'influence des mesures d'atténuation et de vitesse ; d'autres paramètres tels que la compaction et la vitesse ne sont pas décrits car ils présentent moins d'intérêt dans le cadre de notre étude.

Effets de la porosité et de l'humidité sur la vitesse

Les études de [Lo et al. \(2007\)](#) et [Arnott et al. \(2005\)](#) montrent aussi des effets de la composition (granulométrie et sédimentologie) des sols sur la propagation d'ondes acoustiques, à la fois sur l'atténuation et la vitesse de phase (Tableau 2.5). La majorité de la littérature portant sur les mesures acoustiques sur des sédiments font état du fait que la porosité et la présence de fluide dans les espaces des pores est un facteur géotechnique affectant la vitesse et que la vitesse diminue lorsque la porosité augmente ([Shumway, 1960](#); [Hamilton and Bachman, 1982](#)).

Il y a aussi une forte corrélation entre la porosité et la vitesse dans le bois : la vitesse devient plus faible dans le bois dégradé et poreux. Selon l'étude de ([Arnott et al., 2005](#)) l'effet de la densité sur les ondes acoustiques dépend des espèces, et de la structure du bois. L'étude de [de Oliveira and Sales \(2006\)](#) montre que les vitesses ultrasoniques obtenues sur des bois d'arbres tropicaux augmentent avec la densité (pour une même espèce et entre différentes espèces). L'atténuation du signal dépend aussi de la teneur en eau du bois : la vitesse des ondes acoustiques diminue avec la teneur en eau, ce qui est rapporté indirectement dans l'étude de ([Gerhards, 1982](#)) à partir de la détermination des modules d'élasticités.

Effets de la fréquence

L'atténuation du signal dépend de la fréquence d'excitation (comme le montre l'équation 2.36). L'atténuation augmente parallèlement à la fréquence. Ceci s'explique par le fait que plus la fréquence est grande, plus la longueur d'onde λ est petite et par conséquent est sensible aux petites hétérogénéités, ce qui accroît le nombre de diffractions. Les fréquences utilisées doivent être choisies en adéquation avec la résolution et la profondeur de pénétration attendues. Dans notre cas, pour des fréquences à la limite inférieure des ultrasons (20 kHz), les racines trop profondes ne seront pas excitées. La résolution verticale, c'est à dire la distance verticale minimale qui doit séparer deux réflecteurs pour pouvoir les différencier, est définie (en sismique) d'après la relation suivante :

$$R_Z = \frac{0.4 \times V}{f_{max}} \quad (2.37)$$

Plus simplement et pour s'assurer de la validité de la formule de résolution pour des fréquences au delà de la sismique, nous procédons au calcul de résolution en déterminant la longueur d'onde λ sachant :

$$\lambda = V/f_{max} \quad (2.38)$$

Le modèle de [Kolsky \(1963\)](#) permet d'estimer les effets d'atténuation en fonction de la fréquence f de la source, de la vitesse V de l'onde se propageant dans un matériau ayant un facteur de qualité Q d'après la relation suivante :

$$\alpha(\omega) = \frac{|\omega|}{2VQ} \quad (2.39)$$

Avec α le paramètre d'atténuation définit dans le nombre d'onde complexe (k) de la relation 2.36, α la fréquence de l'onde et V sa vitesse.

L'atténuation en fonction du temps $A(t)$ s'exprime en fonction de l'amplitude initiale $A(0)$ et du facteur de qualité Q (qui varie suivant le type de sols) d'après la relation :

$$A(t) = A(0)e^{\frac{-\pi ft}{Q}} \quad (2.40)$$

Cette relation traduit qu'avec la profondeur (i.e le temps), les hautes fréquences sont plus fortement atténuées. De part la configuration d'acquisition (explicité dans la section 2.3.b) et la fréquence des capteurs utilisés, la méthode de tomographie acoustique apporte une information à priori moins en profondeur (≤ 50 cm) que la tomographie électrique.

Effets de l'anisotropie et des altérations biologiques

L'atténuation du signal dans le bois dépend de sa direction d'orthotropie (Beall, 2002; Bucur, 2006). L'atténuation est plus sensible que la vitesse à l'anisotropie (Bucur and Feeney, 1992). La vitesse longitudinale V_L est plus élevée que la vitesse radiale V_R , elle-même plus élevée que la vitesse transversale V_T . L'orientation de la majorité des cellules est parallèle à la direction longitudinale, ce qui explique ces variations de vitesse (Tsoumis et al., 1991). A cause de l'anisotropie, il y a une tendance à diriger les ondes préférentiellement selon les axes majeurs (longitudinal et transversal) quelle que soit la direction du signal d'injection. La décomposition tend à réduire les écarts de vitesse entre la direction radiale et tangentielle (Arnott et al., 2002).

Il est rapporté dans de nombreuses études que la vitesse des ondes ultrasoniques décroît et l'atténuation augmente en présence de décomposition du bois (Gerhards, 1982; Wilcox, 1988; Patton-Mallory and DeGroot, 1990; Lemaster and Wilcox, 1993). Par exemple, des vitesses de propagation déterminées dans du Douglas non-dégradé sont de l'ordre de 1250 m/s, tandis que les zones gravement dégradées présentent des valeurs de 300 m/s à 350 m/s (Wang et al., 2004). Selon Nicolotti et al. (2003), la tomographie ultrasonique s'est avérée être un outil performant pour détecter les altérations internes d'un tronc d'arbre en étant capable de localiser précisément la position des anomalies. Pour les zones altérées, les vitesses de propagation sont comprises entre 600 et 1200 m/s, alors que, dans la zone saine, les vitesses sont comprises entre 1200 et 2000 m/s.

v Hypothèses sur la propagation guidée par la racine

Un guide d'onde est une structure qui permet à un signal de se propager avec un minimum de perte d'énergie en restreignant son expansion à seulement une ou deux dimensions (Morse et al., 1948; Pierce et al., 1991). Dans ces conditions, l'onde est moins atténuée lors de sa propagation. A cause de la réflexion aux frontières du guide, les ondes sont confinées à l'intérieur (la propagation à l'intérieur du guide peut être décrite comme un zig-zag entre les parois) à la condition près définie par la *règle de thumb* que la taille du guide soit du même ordre de grandeur que la valeur de la longueur d'onde (Lamb, 1917). De plus, la taille et la forme du guide influence ses propriétés.

L'ensemble des effets du milieu sur la propagation d'une perturbation en surface est illustré sur la figure 2.31 schématisant la situation que l'on peut rencontrer dans le cas d'une excitation à l'aplomb d'une racine de diamètre suffisamment important pour créer une discontinuité. Physiquement, cette discontinuité existe puisque les valeurs d'impédance acoustique sont différentes (Tableau 2.5). Soit l'onde est réfléchi à la discontinuité sol/racine, soit elle est transmise et réfractée à travers la racine. Dans ce dernier cas, suivant les caractéristiques de forme et les propriétés de la racine, l'onde peut être guidée au moyen de multiples réflexions à l'interface racine-sol.

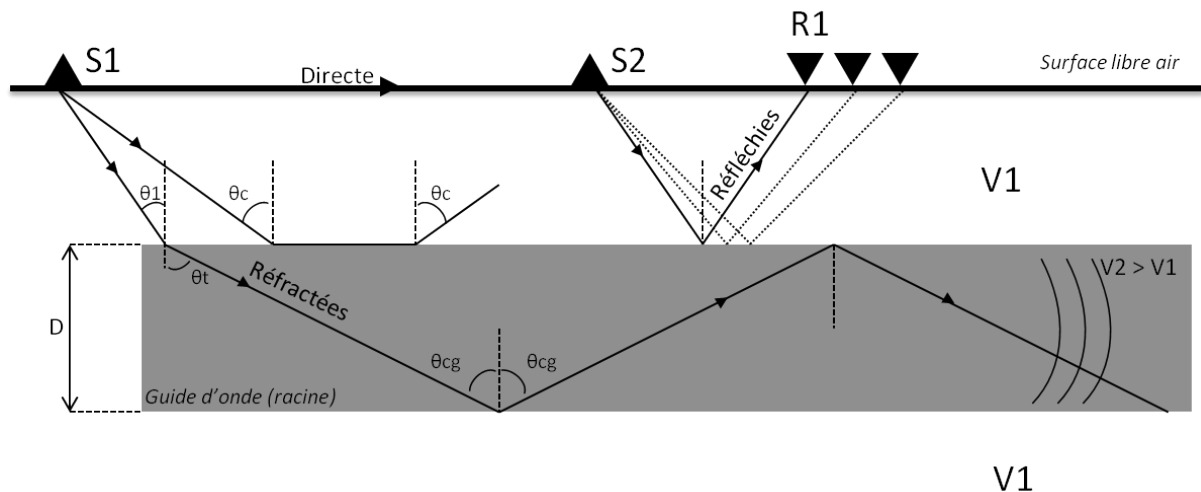


FIGURE 2.31 – Shématisation (échelle non respectée) des phénomènes de réflexion, réfraction et transmission pour un milieu à deux couches (sol et racine) et du phénomène de guide d'onde

Si l'énergie transmise est suffisamment grande et que l'atténuation géométrique n'est pas trop importante, l'onde pourra être transmise jusqu'au tronc et y être enregistrée. Au cours de ces multiples réfractions et réflexions, les propriétés spectrales de l'onde sont affectées.

2.3.b Stratégie d'acquisition

Classiquement lorsqu'une ligne de capteurs (de réception et source) est déployée sur le sol, l'analyse de la section tomographique permet d'identifier trois types d'ondes : les ondes réfractées, réfléchies et de surface. La méthode RINNTECH que l'on nommera par la suite, méthode de tomographie sol/tronc, utilise un capteur de réception directement implanté sur l'arbre. Par conséquent le principe de la mesure et de l'analyse change.

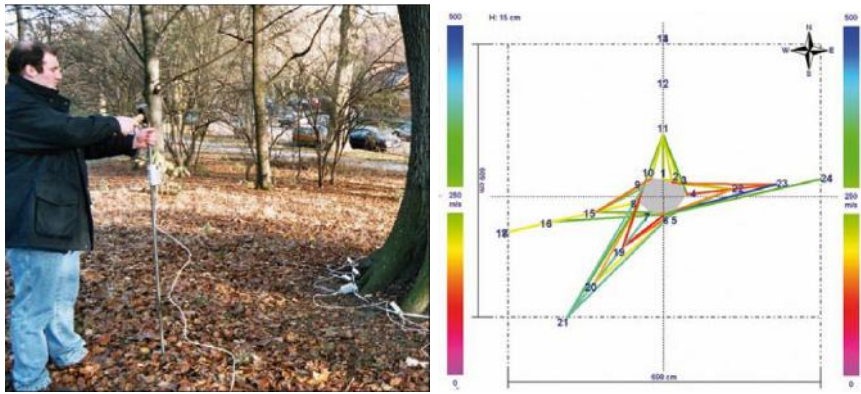
i Applications de la méthode de tomographie sol/tronc

Le protocole, le matériel (instrument ARBORADIX⁵) et les traitements utilisés sont issus d'une littérature peu abondante, principalement composée de rapports techniques non publiés (Rinner, 2005; Rinn, 2005, 2004a,b, 2003, 1999). Ces informations ont cependant pu être complétées par des discussions avec le bureau d'étude RINNTECH. Lorsqu'aucune information n'est disponible, nous présentons de façon générale, les méthodes d'acquisitions classiques.

Principe

Le principe semble relativement simple : une source impulsionnelle non normalisée (opérateur qui tape avec un marteau sur une tige de fer) transmet une onde à travers le sol (figure 2.32a). L'onde produite perturbe le milieu et se diffuse (approximativement dans un cône d'angle 40° sur un sol sec, 20° sur un sol humide). En présence d'une racine, l'onde trouve un milieu suffisamment dense pour se propager. La source doit se situer à une distance maximale de 50 cm à l'aplomb de la racine pour pouvoir l'exciter, autrement la source doit être enfoncée plus profondément. En revanche, lorsqu'aucune racine ne se trouve à proximité, les ondes sont fortement atténuées par le sol.

5. Arboradix® est un dispositif de détection de racines développé par Frank Rinn, fondateur de la société Rinntech à Heidelberg (Allemagne), utilisé en combinaison avec le Arbotom ®. Rinntech est soutenu par ICT Australia International



(a) Principe de l'acquisition

(b) Visualisation des résultats des vitesses de propagations

FIGURE 2.32 – Etapes d'acquisition 2.32a et d'analyse des résultats selon la méthodologie d'après Rinner (2005)

Des capteurs en réception situés sur le tronc (dix d'après la figure 2.32a) enregistrent l'onde qui s'est propagée de la source jusqu'au tronc. Connaissant les effets théoriques du milieu sur la propagation des ondes, une analyse de l'amplitude ainsi que de la vitesse de propagation (de par le temps de trajet) permet d'estimer si la propagation a eu lieu dans une racine ou non. La figure 2.32b représente les résultats de l'acquisition de la propagation sous forme de rais rectilignes pour différentes positions sources (numérotées de 11 à 24). L'échelle de couleur permet de visualiser la vitesse de la propagation (en m/s), celle-ci variant de 0 à 500 m/s. Seuls les trajets correspondant à la présence probable de racines sont représentés.

Les transducteurs audibles et ultrasoniques

Il existe une grande diversité de transducteurs acoustiques. Ils diffèrent principalement de par leurs fonctions, leurs composants, leur sensibilité et leur taille en relation directe avec la gamme de fréquence de fonctionnement. On peut les classer selon les trois critères suivants :

1. Les transducteurs acoustiques peuvent fonctionner en tant qu'émetteur (où ils génèrent une onde acoustique) ou en récepteur (mesurant la perturbation).
2. De plus, parmi les transducteurs acoustiques de mesure, on différencie les capteurs dits de contact, sensibles à une accélération (ou vitesse), de ceux sans contact sensibles à une pression (microphone, hydrophone).
3. Les transducteurs peuvent être large bande et omnidirectionnels ou directionnels est plutôt haute fréquence.

Parmi ces capteurs, certains présentent un intérêt préférentiel pour leurs utilisations dans le cadre de cette thèse : les transducteurs de contact. En effet ils permettent de convertir une onde mécanique en tension électrique (ou l'inverse dans le cas d'une source) en utilisant un cristal piézoélectrique et peuvent être fixés sur le tronc. Parmi tous les paramètres techniques décrivant le fonctionnement d'un capteur (gain, focalisation...), on s'intéresse particulièrement à deux d'entre eux : (1.) la fréquence centrale et (2.) la directionnalité du capteur.

1. La nature du cristal piézoélectrique conditionne sa faculté à "vibrer" à différentes fréquences déterminées par sa gamme de fréquences ainsi que sa sensibilité. Il existe une

fréquence pour laquelle la vibration est optimale, c'est la **fréquence centrale** du capteur. Connaissant cette fréquence, la gamme de fréquences peut être estimée empiriquement en considérant que les fréquences minimale et maximale sont situées à $f_c \pm f_c/2$;

2. La **directionnalité** est la mesure de la variation de l'amplitude de la perturbation en fonction de l'angle autour du capteur. Un capteur est dit omnidirectionnel lorsqu'il émet dans toutes les directions. Au contraire, il est dit directionnel lorsqu'une direction est privilégiée (faisceau).

En général, en plus de la fiche technique fournie par le constructeur, une calibration des capteurs est réalisée en laboratoire avant les mesures.

Les capteurs de mesure de l'instrument Boviari sont des piezoéléments directionnels mesurant la composante verticale de l'onde et sont centrés sur la fréquence de résonance 54 kHz. L'utilisation systématique d'un gel couplant permet une adaptation d'impédance acoustique (d'après la théorie développée dans la partie [iii](#) p.57) et par conséquent, une meilleure transmission de l'onde incidente.

La source

La source, comme pour les capteurs de mesure se caractérise aussi par sa fréquence centrale. Pour générer des ondes de compression (onde P), on utilise généralement une plaque en métal posée au sol (figure 2.33) que l'on vient percuter verticalement avec une masse ou un marteau (Milsom and Eriksen, 2011). L'utilisation d'un pénétromètre dynamique, sur le même principe que dans celui du marteau, produit par la tige vibrante une excitation du sol. Cependant la gamme de fréquences générée n'est pas la même.

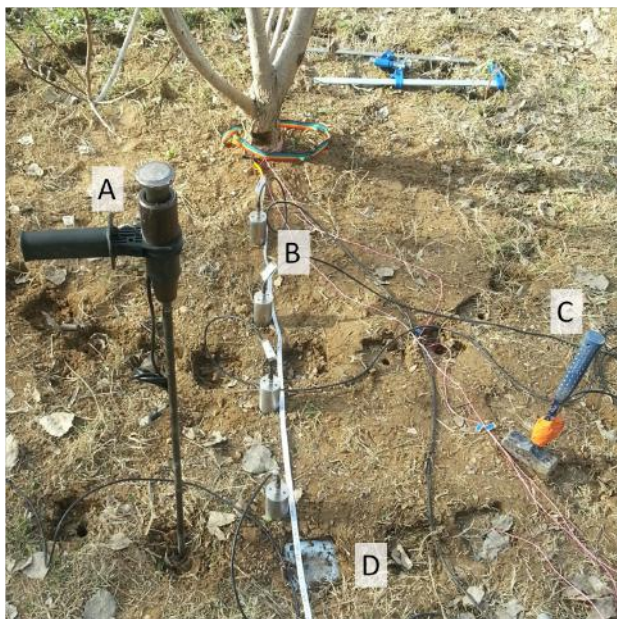


FIGURE 2.33 – Exemple des capteurs (sources et récepteurs) utilisés lors de l'application de la méthode RINNTECH in-situ. A - Pénétromètre dynamique ; B - Transducteur ultrasonique ; C - Source Marteau (un accéléromètre y est fixé) ; D - Plaque en fer permettant de générer des ondes avec la source marteau

Géométrie du dispositif

Des capteurs de réception sont situés à la base du tronc. Dans la méthode RINNTECH, aucune information n'est réellement accessible sur le positionnement et le nombre de capteurs disposés sur le tronc. La source est disposée à différentes positions suivant un maillage concentrique autour de l'arbre en maintenant la distance source/tronc constante. Le nombre de points par unité d'angle définit la résolution angulaire finale. Il est possible de définir plusieurs cercles de différents rayons afin de connaître l'extension latérale des racines primaires traçantes.

Paramètres d'acquisition

Pour extraire les temps de premières arrivées à partir d'un enregistrement, il est nécessaire de connaître avec précision l'instant t_0 auquel la masse vient heurter la source (dans le cas d'une source impulsionnelle). Pour cela, on utilise le plus souvent un accéléromètre fixé sur la masse et relié à l'enregistreur. Au moment de l'impact, l'accéléromètre envoie un signal électrique au sismographe qui déclenche alors l'enregistrement. De plus, afin d'améliorer le rapport signal/bruit, chaque tir (impulsion source) est réalisé plusieurs fois afin de moyennner le bruit et garder le signal utile.

Les temps de parcours sont variables suivant la distance source-récepteurs, c'est pourquoi on s'assure que le temps d'enregistrement soit suffisamment long pour enregistrer tout le train d'ondes, sans quoi il se pourrait que les temps d'arrivée ne soient pas accessibles et que le spectre du signal complet soit biaisé. La fréquence d'échantillonnage doit donc être choisie au moins deux fois supérieure à la fréquence maximale d'intérêt (Nyquist-Shannon). Dans le cas où un signal serait sous échantillonné, cela entraînerait une modification du pointé sur le temps d'arrivée de la première perturbation ainsi qu'un spectre en fréquences faussé.

2.3.c Traitement et analyse des données acoustiques

Un signal réel décrit les variations de paramètres physiques (son, voltage, pesanteur, débit d'un cours d'eau ...), en fonction du temps ou de l'espace, et est constitué de données continues (analogiques). En pratique, les signaux sont discrets (échantillonnés), composés d'un mélange d'information : le signal utile auquel s'ajoute le bruit expérimental. Il existe des outils mathématiques, permettant le traitement et l'analyse du signal afin de s'affranchir au mieux du bruit et d'extraire l'information utile. Nous présentons ici les outils numériques utilisés permettant le traitement des signaux issus des données d'acquisition acoustique.

Les signaux sont considérés comme des quantités physiques pouvant contenir plusieurs dimensions :

- la dimension temporelle $s(t)$;
- la dimension spatiale, 1D $s(x)$, 2D $s(x, y)$;
- les dimensions spatio-temporelles $s(t, x)$.

Lors de l'étude de la transmission d'ultrasons, une impulsion pénètre dans le sol, se propage, puis est enregistrée en un autre point. Le signal reçu est le résultat de réflexions multiples, d'interactions d'ondes, et de changement de mode (Vary, 1988). Différentes caractéristiques du signal peuvent être alors décrites par des quantités physiques telles que la mesure de l'amplitude du signal (proportionnelle à l'atténuation), la vitesse, la forme ou son contenu en fréquences (Beall, 2002). Principalement trois quantités physiques décrites ci-dessous ont été mesurées ou calculées afin de fournir le maximum d'informations avec le minimum de redondance.

i Pointé du temps d'arrivée

Le temps d'arrivée (ou temps de parcours ou encore temps de vol) correspond à la première perturbation du signal de réception (figure 5.28b). Pour les études menées, les temps d'arrivée ont été pointés manuellement pour tous les tirs de chaque profil. La vitesse de propagation est calculée en considérant ce temps t , et la distance d entre la source et la réception :

$$v = \frac{d}{t} \quad (2.41)$$

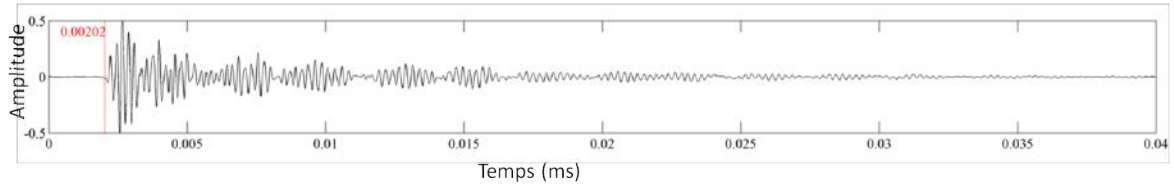


FIGURE 2.34 – Exemple de signal enregistré à l'aide de capteur ultrasonique (Sofranel); la ligne verticale rouge représente le pointé manuel de la première perturbation

Erreur sur les mesures

On considère de façon empirique une incertitude sur le temps d'arrivée (Δt) ainsi qu'une incertitude liée à la mesure de la distance (Δd). L'incertitude absolue sur la mesure de la vitesse s'écrit par conséquent :

$$\Delta V = V \left[\frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta t}{t} \right] \quad (2.42)$$

ii Énergie du signal

Pour décrire l'énergie contenue dans un signal, les ouvrages utilisent le calcul "Root Mean Square" (RMS), défini par la relation :

$$RMS = \frac{1}{T} \sqrt{\int_{t_{ini}}^{t_f} s^2} \quad (2.43)$$

Par abus de langage nous parlerons dans la suite du manuscrit d'amplitude RMS.

iii Transformée de Fourier

Des conversions de modes (dans un milieu fini), des réflexions ou d'autres phénomènes aux interfaces se produisent lors de la propagation et ne sont pas forcément visibles sur le signal dans le domaine temporel. Pour exploiter au mieux le signal reçu, pour toute fonction d'énergie finie, on définit la transformée de Fourier, qui permet de passer d'un signal $s(t)$ enregistré dans le domaine temporel à son équivalent dans le domaine spectral $S(\omega)$ selon l'équation 2.44. Dans le cas de mesure expérimentales, on privilégiera l'interprétation de la densité spectrale de puissance (DSP) qui permet de s'affranchir du bruit de mesure plus efficacement (estimateur non biaisé) en utilisant les fonctions de traitement (sur Matlab©) appropriées plutôt que l'analyse directe du spectre.

$$S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.44)$$

$S(\omega)$ est un nombre complexe avec de module $|A(\omega)|$ et d'argument la phase $\Phi(\omega)$ et peut s'écrire par conséquent sous la forme :

$$S(\omega) = |A(\omega)| e^{i\Phi(\omega)}$$

Où $|S(\omega)|^2$ est la densité spectrale. De cette densité spectrale, deux informations sont directement accessibles : la fréquence de résonance et son amplitude qui témoignent des propriétés du système traversé.

iv Le traitement en ondelettes

Les méthodes non paramétriques adaptées à l'analyse des signaux transitoires, peuvent être séparées en trois catégories :

- l'analyse de Fourier (cf. [iii](#) ci-dessus) ;
- l'analyse temps-fréquence ;
- l'analyse temps-échelle.

Notre but est de résoudre et d'analyser un problème de propagation de signaux à travers un milieu de propriétés variables suivant sa nature (sol ou racine). Nous avons vu que lors de la propagation, en particulier dans un milieu borné ou semi-borné, différents types d'ondes interviennent dans le champ acoustique transmis et leurs paramètres spectraux sont modifiés au cours de la propagation (conversion de mode de propagation, dispersion).

Nous appliquons une méthode qui permet de s'adapter à des évolutions temporelles et spectrales rapides du signal : il s'agit de la transformée en ondelettes ou analyse temps-échelle ([Morlet et al., 1982](#); [Saracco, 1989](#)). Cette méthode permet d'analyser un signal arbitraire en le décomposant en une somme de contributions élémentaires appelées "ondelettes" bien localisées à la fois dans les domaines temporel et fréquentiel ([Grossmann and Morlet, 1984](#)).

Avantage de l'analyse temps-échelle

La transformée de Fourier décompose le signal en sinus et en cosinus, c'est-à-dire en fonctions localisées dans l'espace de Fourier, contrairement à la transformée en ondelettes qui utilise des fonctions localisées à la fois dans l'espace réel et dans l'espace de Fourier. Autrement dit, l'analyse temps-fréquence consiste en une translation en fréquence et translation en temps alors que l'analyse temps-échelle consiste en une dilatation en temps et translation en temps ([Saracco, 1989](#)). Si l'ondelette analysante est complexe, la transformée en ondelettes sera complexe et nous aurons deux informations complémentaires : le module et la phase qui permet d'obtenir les lois de modulation de fréquences des signaux analysés.

Formule de base

La transformation en ondelettes permet de décomposer un signal arbitraire temporel ou spatial $s(p)$ en contributions élémentaires de fonctions appelées ondelettes obtenues par dilatation et translation d'une ondelette mère ou analysante $g(p)$ (figure [2.35](#)).

Posons p la variable temporel dans nos données. Il est possible d'effectuer une analyse locale précise en temps et en fréquence. Selon [Grossmann et al. \(1989\)](#), les coefficients d'ondelettes au point (b,a) sont définies par le produit scalaire entre le signal $s(t)$ avec la famille d'ondelettes dilatée et translatée $\frac{1}{\sqrt{a}}g\left(\frac{t-b}{a}\right)$:

$$S(b, a) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \bar{g}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.45)$$

d doit être admissible i.e. $\hat{g}(\omega = 0) = 0$, où \hat{g} est la transformée de Fourier de g .

Si g est une ondelette analysante complexe, \bar{g} est le complexe conjugué de g , dilaté en temps de a ($a > 0$) et translaté en temps de b ($b \in \mathbb{R}$). a et b sont respectivement le paramètre d'échelle (ou la dilatation) et le paramètre de translation.

Afin de définir correctement et donner un sens physique à la phase des coefficient d'ondelettes, l'ondelette analysante doit vérifier la propriété : $G(\omega) = 0, \omega < 0$ (progressivité côté Fourier i.e $g(t)$ est une fonction analytique). C'est-à-dire doivent satisfaire un critère

supplémentaire : elles doivent être des fonctions analytiques.

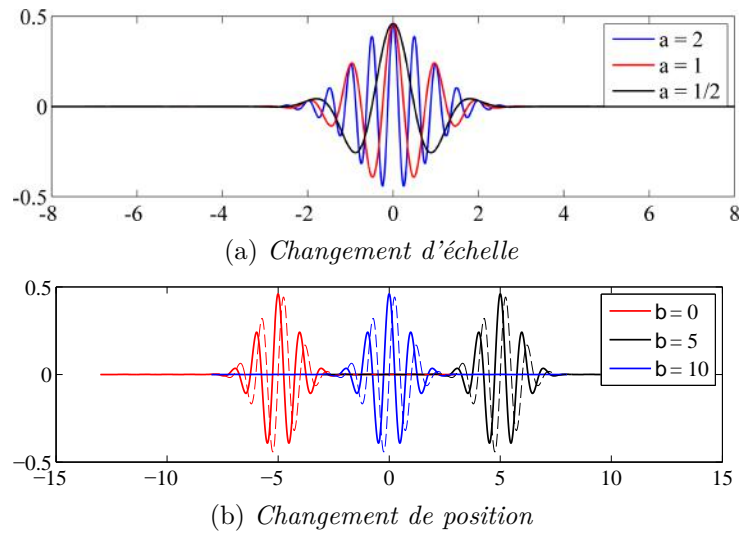


FIGURE 2.35 – Exemple de translation dilatation à partir de l'ondelette de Morlet. En ligne pleine, la partie réelle ; en pointillée, la partie imaginaire

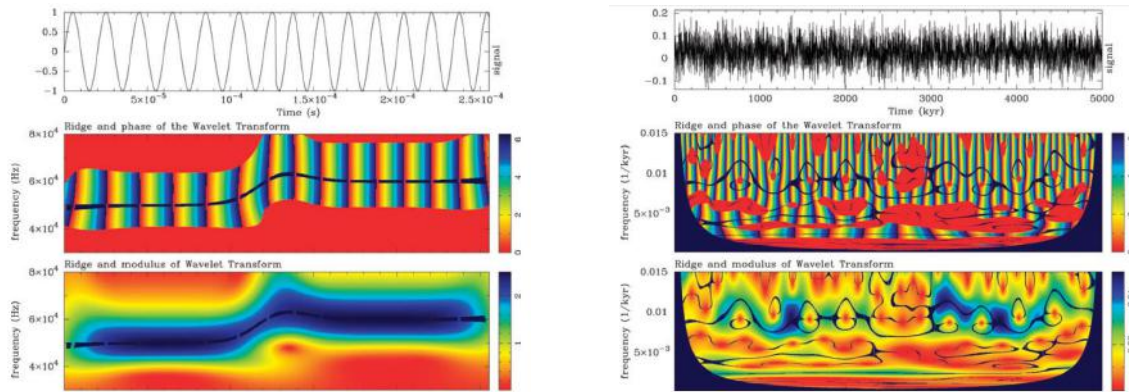
Ondelette de Morlet

L'ondelette de Morlet est obtenue en modulant une exponentielle complexe par une enveloppe gaussienne. Cette forme gaussienne est la raison pour laquelle l'ondelette de Morlet est appréciée. La transformée de Fourier d'une gaussienne est une gaussienne donc elle est bien localisée en temps et en fréquence. En effet, elle permet de minimiser le produit des étalements temporel et fréquentiel de l'ondelette, et donc de maximiser la précision de la localisation de l'énergie dans le plan temps-fréquence. Elle est définie par :

$$g(p) = e^{i\omega_0 p} e^{-p^2/2\sigma^2} \quad (2.46)$$

Avec σ , l'écart type de la fonction Gaussienne.

La figure 2.36 issue des travaux de Saracco et al. (2009), présente un cas d'application simple (figure 2.36) qui illustre l'identification de la transition entre deux signaux monochromatique de fréquence 50 et 60 kHz et un cas concret (figure 2.36) montrant l'efficacité de la transformée en ondelettes pour l'extraction de l'excentricité orbitale (pour un signal de rapport signal/bruit de 0.5) .



(a) Identification de la transition entre deux signaux monochromatiques de fréquence 50 et 60 kHz (lignes noires, arête)

(b) Application de la décomposition en ondelettes pour l'extraction de l'excentricité orbitale pour un signal de rapport signal/bruit de 0.5 (400ka et 100ka, lignes noires)

FIGURE 2.36 – Au milieu : phase de CCWT du signal, En bas : module de CCWT du signal. Le module est représenté avec un code couleur où le maximum d'énergie est en bleu et le minimum en rouge (Saracco et al., 2009)

L'arête (ligne noire) extraite sur la phase permet d'identifier les lois de modulations de fréquence ou lignes spectrales présentes dans le signal (e.g 50,60 kHz figure 2.36a). Finalement, l'analyse en ondelettes a trouvé une réelle application lors du traitement des données. Principalement deux informations sont tirées de la transformation : la naissance ou bien l'extinction de mode de propagation, qui peut être grandement corrélée à la propagation dans un guide d'onde. Sinon extraire une signature acoustique propre au milieu (terre) de celle des racines telle que les fréquences, la loi de dispersion, et l'atténuation Saracco et al. (1990).

2.3.d Synthèse des méthodes acoustiques pour la détection de racines et voies d'améliorations possibles

Malgré les conditions difficiles d'investigation du fait de la constitution des ouvrages hydrauliques en terre, cette méthode semble prometteuse pour la détection de racines. En effet, elle est non destructive, peut être pratiquée à moindre coût, et elle est pratique dans les espaces confinés. Cependant jusqu'à présent, l'information obtenue par cette méthode est limitée à "présence de racine ou non", la taille et la profondeur de la racine n'étant pas définies.

Néanmoins, nous estimons que toute la richesse du signal reçu est loin d'être exploitée notamment lorsque l'on considère en plus de la vitesse et l'amplitude, les propriétés spectrales de la propagation. Des études de calibration permettant de définir des relations (avec leur intervalle de confiance) entre les propriétés de propagation de l'onde en fonction des paramètres de la racine (tel que le diamètre et l'état de décomposition) ont été mises en place et doivent répondre à la question posée par le second point (énoncé ci-dessous) sur lequel peu de résultats sont accessibles. Enfin il serait intéressant de mettre cette méthode à l'épreuve in-situ afin de valider les résultats obtenus en laboratoire.

- **Voie d'amélioration n°1 : prise en compte des incertitudes liées de l'hypothèse de rais de propagation rectiligne**

L'hypothèse de rais de propagation rectiligne est vérifiée à moindre mesures puisqu'en conditions réelles les racines possèdent une tortuosité. Celle-ci influe sur le calcul de

variations de vitesse, la tortuosité étant définie par [Morlat and Venin \(1981\)](#) comme le rapport moyen de la longueur du cheminement réel parcouru entre deux points à la distance rectiligne qui les sépare.

$$\text{Tortuosité} : iT = \frac{L_{Re} - L_0}{L_0} \quad (2.47)$$

$$\text{Vitesse effective} : V_E = V_S \frac{1}{T} \quad (2.48)$$

Lors de l'interprétation des résultats, l'incertitude sur la vitesse calculée doit tenir compte de l'incertitude sur l'hypothèse de rais de propagation rectiligne. L'abaque de la figure 2.37 sert de référence pour définir les intervalles d'incertitudes sur la tortuosité. Plus la tortuosité est élevée, plus la distance de propagation est grande et plus la vitesse mesurée est sous estimée (ex : pour 20% de tortuosité, si la vitesse mesurée vaut 450 m/s alors la vitesse réelle est de 550 m/s).

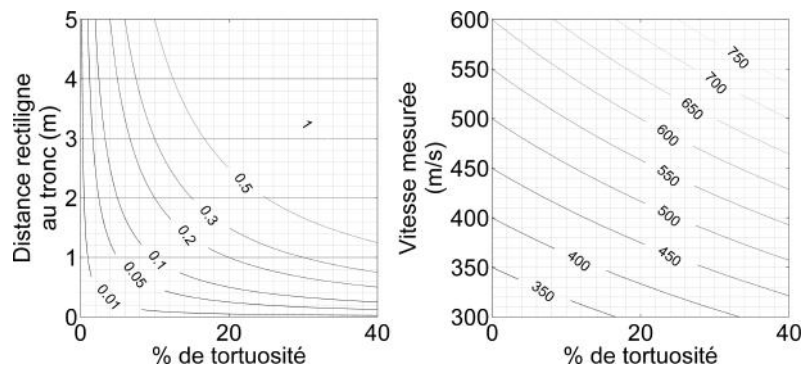


FIGURE 2.37 – A gauche : erreur en mètre sur l'estimation de la distance au tronc ; à droite : vitesse réelle (isovaleurs) en fonction de la tortuosité et de la vitesse mesurée

- **Voies d'améliorations pour la réduction de l'incertitude**

La propagation le long d'une racine peut être discriminée du sol selon les trois critères suivants : vitesse, atténuation de l'énergie et modification du spectre lors de la propagation. Cependant, en tenant compte de l'hypothèse simplificatrice d'une propagation rectiligne, et du fait que de nombreux facteurs externes peuvent influencer les mesures de la vitesse et de l'atténuation, l'incertitude sur la détection reste grande.

La méthode pourrait être améliorée à chaque étape :

- à l'acquisition en proposant une étude sur la source la plus adaptée entre un marteau et un pénétromètre dynamique. La gamme de fréquences (fréquence centrale) du capteur en réception sur le tronc sera aussi l'objet d'essais ;
- lors de l'étape de traitement, les caractéristiques spectrales de la propagation seront analysées comme paramètre additionnel de discrimination sol/racine ;
- enfin, fort de la connaissance acquise lors des essais en laboratoire, une meilleure compréhension des valeurs absolues de vitesse et d'atténuation permettrait une meilleure interprétation des signaux mesurés in-situ.

Synthèse du chapitre

Plusieurs méthodes géophysiques sont applicables dans le contexte des digues en remblai pour la détection de racines. Cependant, pour mettre en place une méthode opérationnelle tenant compte des spécificités (topographie, ligne piezométrique), les orientations de méthodes à privilégier en considérant l'efficacité et la résolution sont la tomographie de polarisation provoquée et la tomographie acoustique.

La bibliographie a montré que la mesure électrique autour des systèmes racinaires pouvait être influencée par de nombreux facteurs internes (type de sol, teneur en eau, flux de sève...) ou bien en interaction avec l'environnement (absorption d'eau) : ces facteurs peuvent être vus soit comme des limites soit comme des atouts à la détection. Les études en laboratoire et en conditions semi-contrôlées mises en place dans le cadre de cette thèse permettront de connaître quelles sont les conditions de mesure les plus favorables à la détection et d'en identifier les limites.

Un couplage avec une méthode acoustique semble indispensable pour palier les limites de la méthode électrique mais aussi pour permettre une meilleure interprétation des résultats. Des recherches (de faisabilité) basées sur la méthode RINNTECH ont été réalisées afin de faire face aux limites énoncées par la littérature existante, en développant de nouveaux protocoles d'acquisition associés à des traitements originaux (traitement en ondelettes).

CHAPITRE 3

Objectifs et propositions

3.1 Les questions scientifiques de la thèse

Le principal questionnement scientifique de cette recherche porte sur l'élaboration et l'évaluation des méthodes électriques et acoustiques de prospection, leurs protocoles de mise en œuvre et leurs modèles d'interprétation associés permettant de localiser des racines ligneuses de différentes espèces d'arbres, dans différents types de sol, de cartographier leur cheminement et d'évaluer leurs dimensions. Ceci implique d'analyser les paramètres influençant la mise en œuvre des méthodes, ce qui est donc par essence un sujet pluridisciplinaire, faisant appel :

- à la mécanique des sols et à la géotechnique pour traiter les questions liées à l'ouvrage en tant que terrain d'étude ;
- à la biologie, pour appréhender le comportement de la partie végétale en tant qu'objet à identifier et de vecteur des courants électriques ;
- à la géophysique, afin d'identifier et de développer les méthodes les plus adaptées pour détecter le matériel biologique présent dans un remblai.

Les questions scientifiques auxquelles doit répondre cette thèse sont les suivantes :

Question scientifique 1 : *peut-on développer une méthode géoélectrique basée sur la mesure de polarisation provoquée pour détecter des racines dans un cadre contrôlé de laboratoire ou semi-contrôlé in-situ ?*

Question scientifique 2 : *peut-on développer une méthode acoustique par tomographie avec réception sur l'arbre pour détecter des racines dans un cadre contrôlé de laboratoire ou semi-contrôlé in-situ ?*

De nombreux travaux ont été réalisés en laboratoire (cf. sections 6.2 et 5.2), proposant une étude sur les relations entre les propriétés électriques et acoustiques intrinsèques des racines et la mise en évidence de critères de différenciation contrastant avec les propriétés des sols. Les essais de laboratoire et in-situ semi-contrôlés permettent de travailler dans des conditions contrôlées afin d'étudier indépendamment chaque paramètre.

Les sections 6.3 et 5.3 présentent le travail réalisé en conditions semi-contrôlées sur un dispositif mis en place. Ces essais ont pour objet de valider les signatures caractéristiques mises en évidence en laboratoire en considérant toutes les sources de variabilité présentes en conditions in-situ (différentes tailles de racines, phénomènes d'absorption, températures, bruit expérimental...).

Question scientifique 3 : *les développements méthodologiques retenus en conditions (semi-)contrôlées peuvent-ils être appliqués sur une digue réelle ? Quelles sont les limites de leur applicabilité ?*

Enfin nous souhaitons apporter une partie de réponse à l'applicabilité des développements. Dans ce sens, des essais ont été réalisés sur des arbres en place sur une digue de protection contre les inondations (cf. chapitre ??).

3.2 Objectifs

Les objectifs énumérés ci-dessous découlent des questions scientifiques de la thèse énoncées précédemment. Ils sont présentés de l'objectif à plus court terme vers l'objectif à long terme.

Élaboration et évaluation de méthodes de prospection

La thèse répond précisément à l'objectif d'élaborer par des méthodes géophysiques de nouvelles techniques pour imager les sols afin d'y détecter la présence de racines, leur densité, ainsi que définir leurs positions (profondeur, extension).

Une meilleure appréhension des phénomènes d'érosion impliquant la végétation

Dans un second plan, cette recherche permet une meilleure compréhension de la croissance racinaire dans le contexte des digues afin d'appréhender au mieux son implication dans les phénomènes d'érosions associés.

Apporter des solutions aux gestionnaires de digues

Enfin, les avancées scientifiques doivent servir les acteurs principaux, les gestionnaires de digues, afin de faciliter leurs décisions, en adoptant une gestion raisonnée de la végétation sur les ouvrages.

3.3 Méthodologie adoptée au cours de la thèse

Notre démarche scientifique est une démarche expérimentale, appliquée à la fois pour le développement des méthodes géoélectrique et acoustique (figure ??).

Nous proposons de travailler à différentes échelles expérimentales :

- en laboratoire en conditions contrôlées ;
- in-situ sur des placettes en conditions semi-contrôlées ;
- en situation réelle sur des digues en remblai.

A chaque étape, notre démarche consiste à proposer des protocoles expérimentaux pour traiter les questions scientifiques de la thèse.

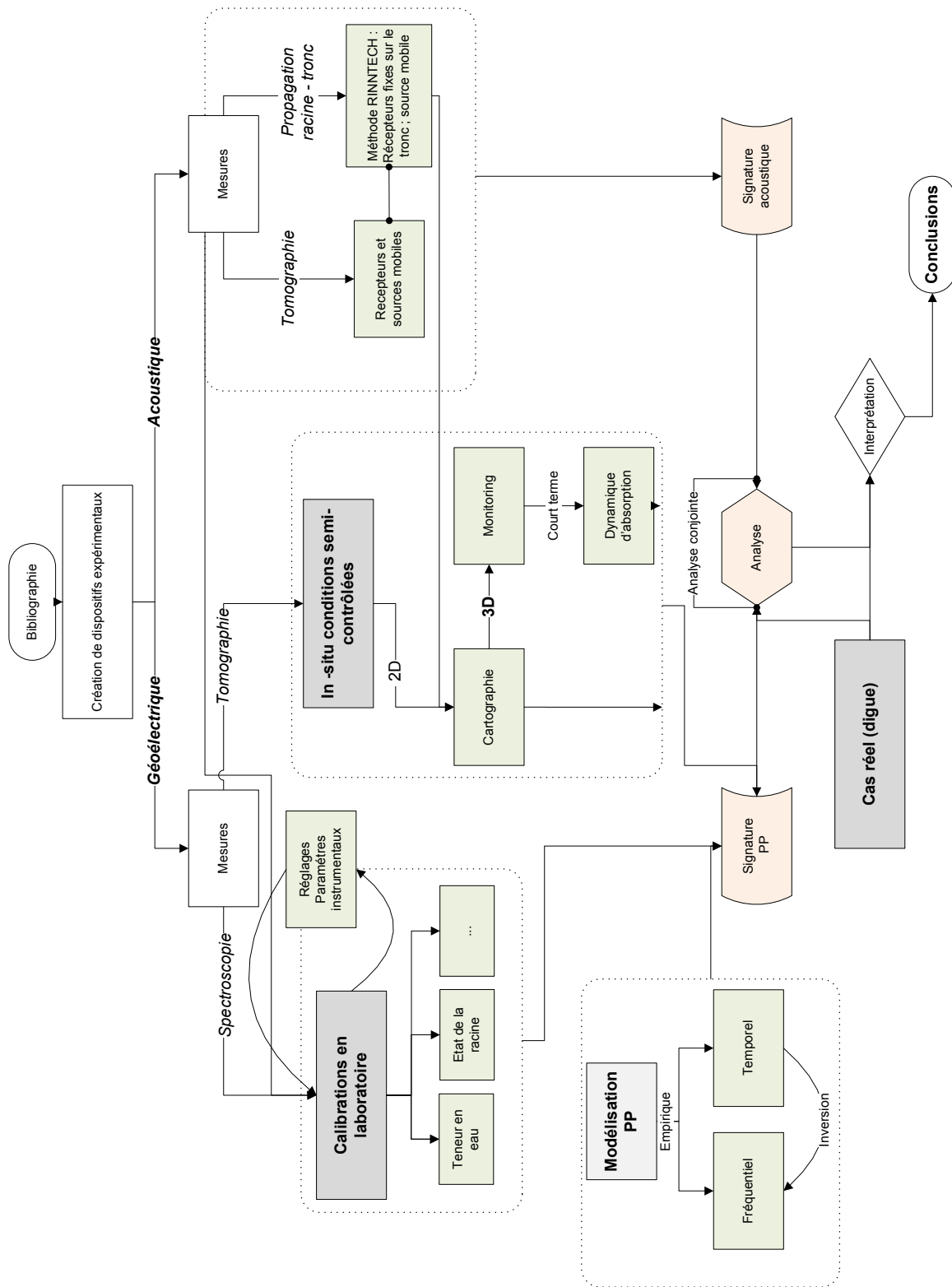


FIGURE 3.1 – Méthodologie générale adoptée au cours de la thèse : de la compréhension des phénomènes à petite échelle (microscopique) vers les phénomènes à plus grande échelle (macroscopique)

Étude expérimentale au laboratoire et en conditions semi-contrôlées

CHAPITRE 4

Supports expérimentaux

La démarche expérimentale à mettre en œuvre nécessite des supports expérimentaux adaptés pour répondre à la problématique de la compréhension des phénomènes, en laboratoire jusqu'à l'étude in-situ en conditions réelles. La principale contrainte de mise en place est de prendre en compte le caractère vivant de la végétation qui impose de respecter les conditions d'implantation dans un sol et de lumière favorables à la croissance des arbres. Pour pallier ce problème les mesures sont réalisées sur des échantillons racinaires, en laboratoire. Pour cela, un travail important est réalisé lors de campagnes de terrain afin d'extraire des arbres en place et pour en collecter des échantillons de racines (cf. section 4.1). Ce travail a été réalisé à différentes dates précédant une mesure programmée. Pour les essais en extérieur, un dispositif expérimental est construit en implantant des arbres sur le site d'IRSTEA Aix-en-Provence (cf. section 4.2). Les travaux ont été effectués dès la première année de la thèse pour que la végétation puisse reprendre une activité naturelle. Les motivations et la stratégie de construction afin de répondre à la problématique de détection sont expliquées en détail dans les paragraphes suivants.

4.1 Collecte d'échantillons racinaires

Nous disposons de deux types de dispositifs sur lesquels les échantillons ont été prélevés : (i) les échantillons prélevés à l'état frais, à partir de dessouchage d'un arbre à la suite d'un plan de gestion de la végétation sur une digue de l'Isère ; (ii) le second type d'échantillons est issu de dispositifs de décomposition. Ces dispositifs, mis en place lors de précédentes études (Zanetti, 2010a), sont venus compléter la diversité des échantillons prélevés, en particulier pour ce qui concerne leur état de décomposition.

i Échantillons obtenus des dessouchages

Digue de l'Isère

Lors de la visite de terrain du 7 août 2013 sur la digue secteur amont (Isère) de l'AD-Isère Drac Romanche, des souches d'arbres de différentes espèces (frêne, robinier, peuplier) ont été repérées. La date de coupe de ces souches est connue grâce au suivi mis en place dans le cadre d'un plan de gestion de la végétation sur les digues de l'Isère.



FIGURE 4.1 – Dessouchage d'une souche de frêne implantée sur la digue de l'Isère ; photographies Daniel Bambara

Après extraction (figure 4.1), les échantillons racinaires sont classés suivant l'espèce, la date de coupe ainsi que leurs diamètres. Leur masse fraîche est relevé la même journée, puis les échantillons sont placés dans une pièce non exposée avant leur utilisation. Il est important de noter

que certaines de ces souches avaient rejeté au moment de leur déterrage, ce qui laisse pressentir que certaines racines étaient toujours vivantes (la date de coupe n'est pas forcément la date du début de décomposition). L'analyse SPIR (Spectroscopie Proche Infrarouge) a montré que ces échantillons ont une composition chimique qui s'apparente majoritairement à des échantillons de bois sain. Les échantillons collectés sont répertoriés dans le tableau 4.1 suivant :

Espèce végétale	Date de coupe	Rejet ou non de la souche	Diamètres relevés
Chêne (1C ^a)	2008	Oui	03 - 05 - 08
Frêne (1F)	2009	Non	03 - 05 - 08 - 10
Frêne (2F)	2009	Oui	03 - 05
Frêne (3F)	2009	Oui	05 - 08
Frêne (5F)	2009	Oui	03 - 05 - 08 - 10
Peuplier (2P)	2008	Oui	03 - 05 - 08 - 10
Robinier (3R)	2008	Oui	03 - 05
Robinier (4R)	2008	Oui	03 - 05 - 08 - 10
Robinier (5R)	2008	Non	03 - 08 - 10

Tableau 4.1 – *Échantillons de racines restés sur souches issus de la campagne de déterrage sur les digues de l'Isère en août 2013*

a. Les noms de souches (1C, 1F, ...) ont été établis lors de leur repérage et déterrage.

ii Échantillons obtenus d'un dispositif de décomposition

Digue de Mallermort

Afin de suivre l'évolution de la décomposition des racines ligneuses, des dispositifs expérimentaux, contenant des échantillons de racines issus d'arbres fraîchement coupés, ont été enterrés dans le cadre d'une précédente étude sur des remblais de digues "tests" situées dans différentes zones géographiques (Zanetti et al., 2013). L'évolution de la décomposition des échantillons de racines ligneuses est suivie, après chaque campagne de déterrage à différents temps T (T1 = Temps initial + 1 ans, T2 et T4, voir T6), en fonction de l'espèce de l'arbre et pour différents diamètres. Les échantillons coupés d'environ 20 cm de longueur sont disposés dans des paniers en inox et sont enfouis à environ 50 cm de profondeur (figure 4.2). Les racines provenant du dispositif du site de Mallermort et Casterino sont composées de quatre espèces ligneuses de feuillus : chêne, frêne, robinier faux-acacia et peuplier.



(a) Phase initiale de mise en place du dispositif de décomposition pour des échantillons à l'état frais (Photo C.Zanetti)



(b) Extraction des échantillons du dispositif en Isère après 6 ans de décomposition (Photo G.Bambara)

FIGURE 4.2 – *Dispositifs à différents stades de décomposition d'échantillons racinaires*

Les protocoles établis pour l'évaluation des propriétés intrinsèques électriques et acoustiques des racines ligneuses utilisent à la fois les échantillons tirés de déssouchage et ceux issus du dispositif de décomposition.

4.2 Construction d'un dispositif expérimental d'étude d'arbres en place

Le site d'implantation des arbres est un pré situé sur le site d'IRSTEA à Aix-en-Provence (figure 4.3), dans le sud de la France ($N43^{\circ}31'24.0''N$, $E5^{\circ}30'42.0''E$). Le climat méditerranéen est caractérisé par des étés chauds et secs et par des hivers doux et pluvieux. Une station météorologique est disponible à proximité (200 m) et apporte des informations sur les précipitations et la température.

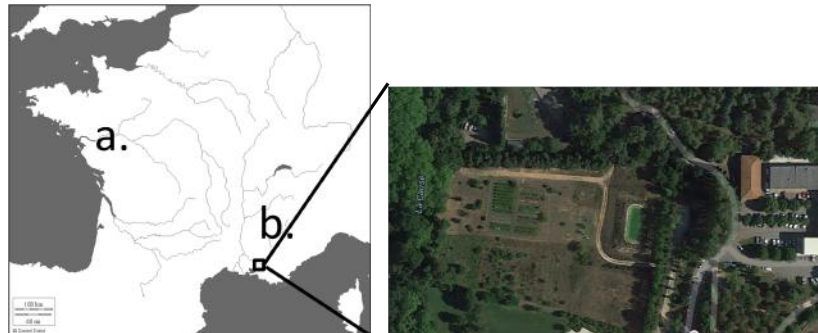


FIGURE 4.3 – Vue aérienne du dispositif expérimental situé à Aix en Provence en région PACA

i Motivation : le besoin d'un milieu homogène

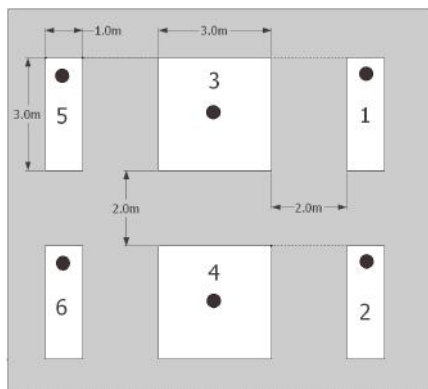
Comme le sol naturel n'est pas homogène, un dispositif expérimental permettant de travailler dans des conditions contrôlées de sol est établi. Les arbres, des peupliers âgés de trois ans et recépés, sont plantés dans de larges trous (1 m de profondeur) remplis avec un matériau de type limono-argileux dont les propriétés physiques et chimiques sont décrites dans le tableau 4.2 et sur la figure 4.5. Ce sol est choisi car il est représentatif de la composition des digues. En effet, les matériaux limono-argileux, ou encore plus argileux, possèdent des propriétés de faibles perméabilités intéressantes pour contenir un flux d'eau. L'ensemble des mesures de laboratoire et de terrain se sont concentrées sur ce type de sol.

Ces peupliers (*Populus alba* L.) ont été choisis car ils comptent parmi l'espèce la plus représentée sur les digues et développent rapidement leurs systèmes racinaires généralement composés de longues et grosses racines traçantes. Les arbres ont été plantés en avril 2013 et irrigués pendant six mois afin d'assurer leur reprise et croissance.

Ainsi chaque placette est préalablement décaissée sur un mètre de profondeur (figure 4.4), puis remblayée de façon homogène avec le matériau choisi. Ceci permet de faire l'hypothèse simplificatrice que l'anomalie potentiellement mesurée est due à la présence d'une racine et non au changement de la constitution du sol. Les conditions de compaction et de teneur en eau sont ainsi supposées homogènes sur l'ensemble des placettes dans lesquelles sont implantés les arbres, en assurant une irrigation la plus homogène possible.

Le choix de ce site pour l'implantation du dispositif est motivé par les critères suivants :

- il est possible d'irriguer les arbres, dans un premier temps pour assurer leur croissance, puis plus tard il sera possible d'irriguer localement chacune des placettes permettant



(a) Disposition des arbres et configuration des placettes d'acquisitions



(b) Décaissement des placettes sur 1 m de profondeur et remblayage par un matériau fin de façon homogène

FIGURE 4.4 – Mise en place du dispositif expérimental

- d'évaluer le potentiel de détection des racines en fonction des paramètres hydriques du sol ;
- une station météo se situe à proximité du site et permet d'obtenir un relevé de pluviométrie ;
 - aucun arbre ni système racinaire résiduel, susceptible de perturber l'expérience, ne se situe à proximité ;
 - l'ensoleillement est homogène sur l'ensemble de la zone d'étude tout au long de la journée.

Néanmoins, la topographie légèrement en pente (3%) est un inconvénient qu'il faudra prendre en compte par la suite.

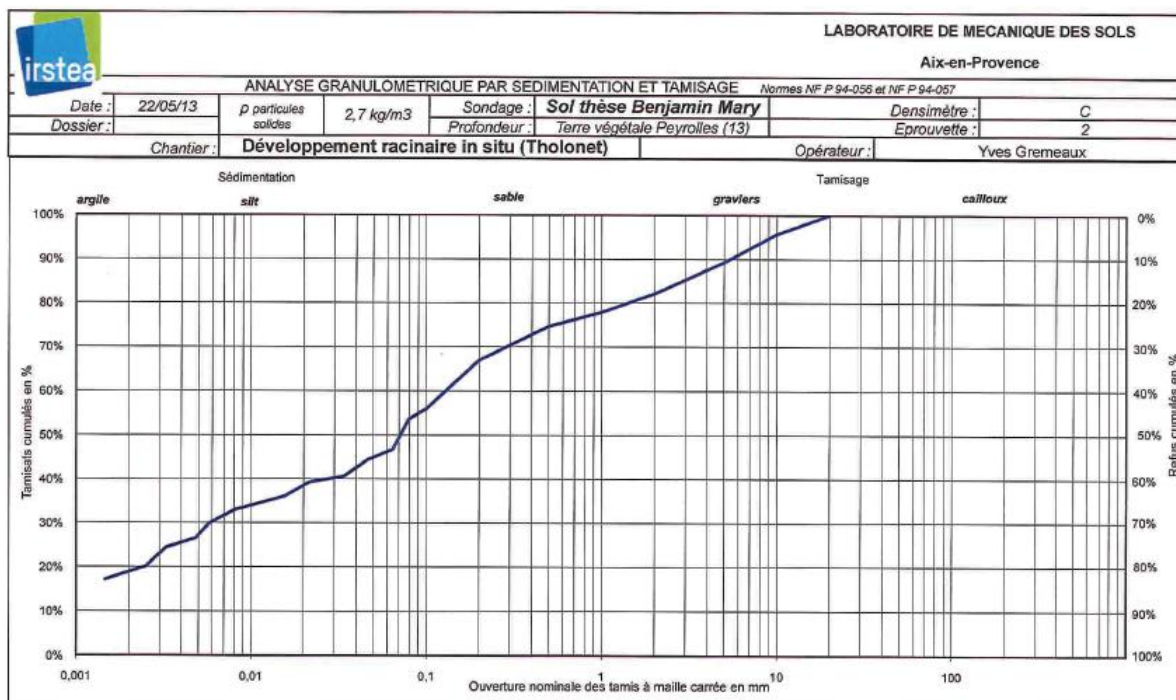


FIGURE 4.5 – Analyse granulométrique selon les normes NF P 94-056 (Tamisage) et NF P 94-057 (Sédimentation) d'un échantillon du matériaux extrait du dispositif

Analyse	Type	%
Granulométrie/Sédimentometrie (IRSTEA NF P 94-056 et NF P 94-057)	Graviers	5.8
	Sables	19.2
	Silts	51.6
	Argiles	22.7
Chimiques (Laboratoire agricole roussière-bec)	CEC	124.3
	Matière organique	2.38

Tableau 4.2 – *Analyse du sol utilisé lors des expérimentations in-situ et en laboratoire*

ii Stratégie de construction

Les peupliers sont implantés dans deux types de placettes afin d’y effectuer différents essais d’acquisitions :

- placette de dimension 1x3 m (largeur/longueur) : sur ce format de placette, il est possible de cartographier de longues racines traçantes superficielles. La placette n°1 (figure 4.6) est le support de notre étude ; Elle permet d’étudier les effets de teneur en eau sur le potentiel de détection. La placette n°5 (figure 4.7) a permis d’étudier l’influence de la fréquence sur la réponse de polarisation provoquée. Sur chacune d’entre elles, des racines isolées superficielles se développent dans la direction de la longueur de la placette ;
- placette de dimension 3x3 m (largeur/longueur) : la placette n°3 est le support d’une étude d’acquisition de cartographie en considérant des mailles concentriques ou carrées autour de l’arbre placé au centre. Les profils dans ce cas sont plus longs et permettent d’avoir une information plus en profondeur. Sur cette placette, nous avons réalisé des essais en acoustique qui nécessitent une rotation de 360° autour de l’arbre ;
- placette de référence : la placette de référence n°6 (figure 4.4a) est vierge de toutes racines et seuls les effets liés à la nature du sol sont mesurés. Les propriétés physico-chimiques sont décrites dans le tableau 4.2 et sur la figure 4.5.

iii Information a priori : exemples de relevés des positions des racines sur les placettes n°1, 3 et 5

La position de chaque racine principale (orientation et profondeur) a été relevée avant l’étape de plantation. Trois arbres ont été le support de nos études. Les photographies présentées ci-dessous permettent de visualiser l’état initial de leur système racinaire.

H]

FIGURE 4.6 – Plantation du peuplier sur la placette n°1; identification des directions et diamètres des trois racines principales (26/04/2013); la position et la taille des racines ont aussi été relevées à la suite des essais

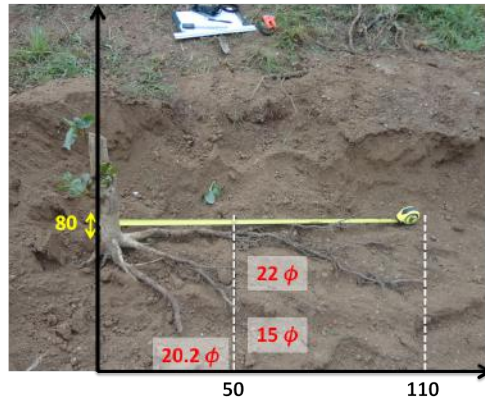


FIGURE 4.7 – Plantation du peuplier sur la placette n°5; identification des directions et diamètres des deux racines principales (26/04/2013)

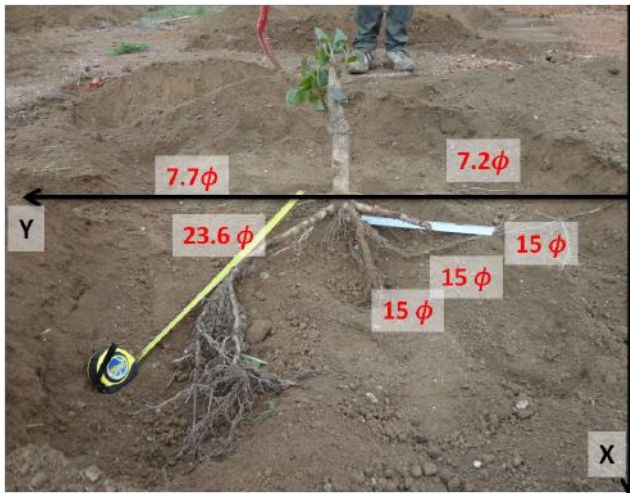
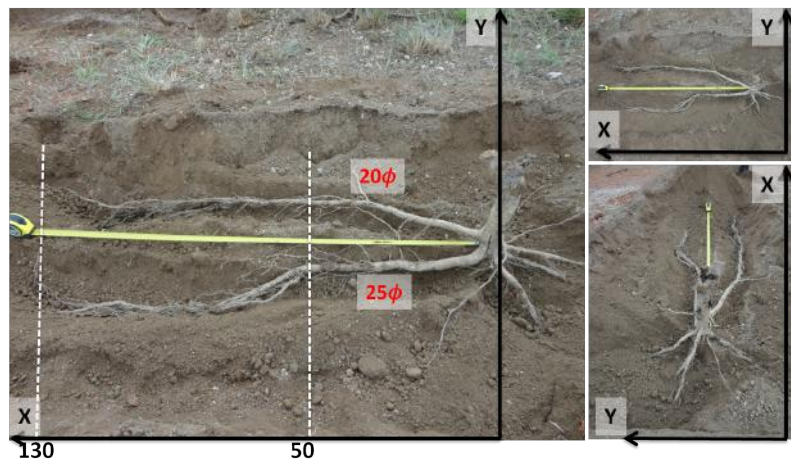


FIGURE 4.8 – Plantation du peuplier sur la placette n°3; identification des directions et diamètres des 5 racines principales (26/04/2013); la position et la taille des racines ont aussi été relevées à la suite des essais

Pour rendre compte de l'évolution des systèmes racinaires (premières mesures après six mois d'adaptation), à la suite des mesures, sur les placettes n°1 et 3, nous avons pris le soin de relever à nouveau la position des racines superficielles, en les déterrées progressivement sur l'ensemble de la placette. La direction et la profondeur des racines principales restent pratiquement inchangées mais leurs diamètres et leurs longueurs ont respectivement pratiquement triplé et doublé par rapport à l'état initial lors de la plantation.

Les relevés à l'état initial ont permis d'optimiser la disposition des capteurs, notamment afin de sélectionner une racine isolée traçante, mais également bien estimer les profondeurs moyennes d'investigation à considérer.

iv Synthèse

Le dispositif conçu dans le cadre de cette thèse permet d'envisager, des résultats à court terme ainsi qu'à long terme. Les deux approches, électrique et acoustique, que nous souhaitons mettre en place peuvent être déployées. Ce dispositif expérimental d'étude d'arbres en place est préliminaire à la mise en place d'essais en conditions réelles in-situ.

CHAPITRE 5

Imagerie acoustique

Sommaire

5.1	Introduction	83
5.2	Étude des propriétés acoustiques en laboratoire	84
5.2.a	Mesures en transmission d'échantillons	84
5.2.b	Résultats et interprétation	88
5.2.c	Mesure en tomographie	93
5.2.d	Résultats et interprétation	95
5.3	Tomographie acoustique de type sol/tronc	104
5.3.a	Introduction	104
5.3.b	Méthodologie expérimentale	107
5.3.c	Validation de la méthodologie de tomographie sol/tronc	109
5.3.d	Comparaison des résultats avec la position réelle des racines	116
5.4	Conclusions, limites et perspectives	122

5.1 Introduction

Le travail qui sera conduit à la fois en laboratoire puis dans notre dispositif expérimental in-situ sera axé sur le développement et l'amélioration de la méthode de la tomographie sol/tronc. Cette approche, inspirée d'une technique proposée lors de prestations du bureau d'études RINNTECH, semble être intéressante pour sa rapidité de mise en place et son faible coût.

Le principe mis en œuvre par RINNTECH repose sur une tomographie peu conventionnelle pour laquelle les transducteurs de réception sont directement fixés sur le tronc de l'arbre alors que la source est mobile autour de l'arbre. Ainsi on reconstruit une surface de sol en considérant une série de trajets source-récepteurs à différentes distances et angles autour du tronc. Les propriétés de la surface reconstruite sont déterminées après traitements des signaux issus de la propagation. L'étude des variations de vitesse de propagation (par rapport à la vitesse du milieu environnant) sont les critères sur lesquels la méthode s'appuie pour définir si l'onde s'est propagée au travers d'une racine. La méthode RINNTECH présente plusieurs limites. Tout d'abord, le fait de ne disposer que de deux transducteurs implique que l'information est a priori limitée à une profondeur d'investigation. De plus à ce jour, il n'y a pas de traitement d'inversion des données permettant de retrouver la profondeur ainsi que les propriétés réelles de l'anomalie racinaire recherchée. L'information sur la détection potentielle d'une racine est donc simplement qualitative (c'est à dire oui/non sur la présence).

Dans le cadre de ma thèse, nous proposons dans un premier temps de valider cette méthode et d'en identifier les apports et les limites de son application à la problématique de détection de racines sur les ouvrages hydrauliques. Ensuite, nous souhaitons aller plus loin en introduisant les propriétés spectrales comme analyse additionnelle afin de différencier la propagation à travers le sol de celle à travers la racine.

Pour cela, les essais expérimentaux que nous proposons comportent deux étapes :

- une étape d'étude en laboratoire sur des échantillons racinaires préparés. Les signaux analysés sont issus de la **transmission source-récepteur le long de l'échantillon** (cf. section 5.2) ;
- une seconde étape de **tomographie en cuve**. Les signaux d'une cuve de référence (sol sans racine) et d'une cuve dans laquelle est placé un échantillon racinaire sont comparés (cf. section 5.2.c).

5.2 Étude en laboratoire des propriétés acoustiques d'échantillons racinaires

La prospection ultrasonique est couramment utilisée comme une méthode non-destructive afin de caractériser les propriétés du bois avec divers champs d'applications tels que le contrôle de leur qualité acoustique (instruments) ou mécaniques (poutres, structures...) (Brancheriau et al., 2006), ou encore l'utilisation lors de tomographies de tronc afin de détecter des décompositions (Wang et al., 2004; Lasaygues, 2006). Les quantités physiques les plus fréquemment visibles dans la littérature sont la vitesse de propagation et l'atténuation car elles permettent de retrouver les caractéristiques mécaniques intrinsèques du bois (modules de rigidité, d'élasticité...). Dans le cadre de cette étude, notre objectif vise à déterminer les propriétés physiques pertinentes pour discriminer la propagation à travers une racine par rapport à celle au travers d'un sol.

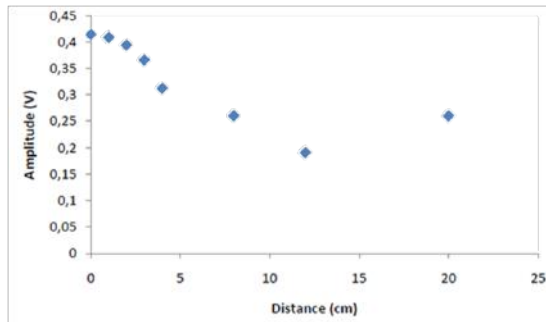
5.2.a Mesures en transmission d'échantillons

i Calibration de la source

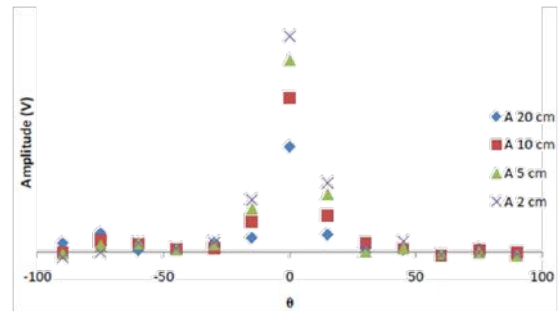
Dans un premier temps, nous définissons quelques propriétés fondamentales (diagramme de rayonnement, atténuation, bande passante) de la source lors de l'étape de calibration. Au cours de nos expériences, nous avons utilisé un instrument de mesures ultrasoniques de marque Boviart et de modèle "TDA16". Le logiciel associé permet de sauvegarder les données afin de réaliser des traitements post-acquisition. Nous utilisons un transducteur source, qui d'après les indications du fabricant est directionnel. Plusieurs transducteurs de fréquence centrale différente sont fournis avec la centrale d'acquisition. Nous avons privilégié les transducteurs de basse fréquence et de fréquence centrale de 54 kHz, ayant une bande passante à la limite supérieure de l'audible. Ceci permet d'obtenir a priori un bon compromis entre résolution et atténuation. Les caractéristiques du transducteur source ont été vérifiées lors de la calibration en utilisant les transducteurs source et réception de l'instrument de mesure TDA16. La calibration est réalisée dans l'air (milieu homogène). La calibration s'effectue avec un capteur fixe (source) et un second (réception) qui, par rapport à la source, effectue un mouvement de translation (figure 5.1a) ou de rotation (figure 5.1b).

A partir de la figure 5.1a, l'étude des variations de l'amplitude (du second pic positif) en fonction de la distance pour un angle Θ par rapport à l'angle défini par la normale au transducteur permet d'étudier la direction de l'onde émise. Quelle que soit la distance source récepteur, 70% du signal est contenu entre -20 et 20% d'angle. Le transducteur est donc directionnel.

Toujours d'après la figure 5.1a, l'amplitude décroît avec la distance source-récepteur, qui varie entre 2 et 20 cm.



(a) *Etude des variations de l'amplitude (du second pic positif) en fonction de la distance pour un angle $\Theta = 0^\circ$*



(b) *Variation de l'amplitude (du second pic positif) en fonction de l'angle pour différentes distances SR*

FIGURE 5.1 – *Calibration du transducteur source du Boviari (effectuée par D. Baden)*

A partir de la figure 5.2, l'enregistrement de l'onde sur une durée de 1 ms permet de mettre en évidence des lobes d'amplitudes équidistants. La distance entre chaque lobe augmente avec la distance entre les transducteurs source et réception. Ces lobes sont probablement liés à de multiples réflexions sur les transducteurs source et réception. Le spectre de réponse est étudié entre 10 et 100 kHz. Le maximum des pics spectraux est situé à 54 kHz, ce qui correspond bien à la fréquence centrale des transducteurs. Avec la distance, l'amplitude moyenne du spectre diminue, quelle que soit la fréquence.

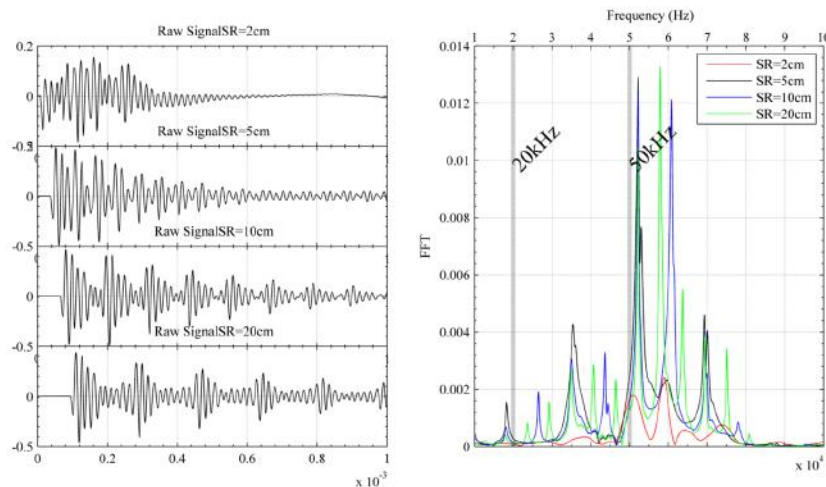
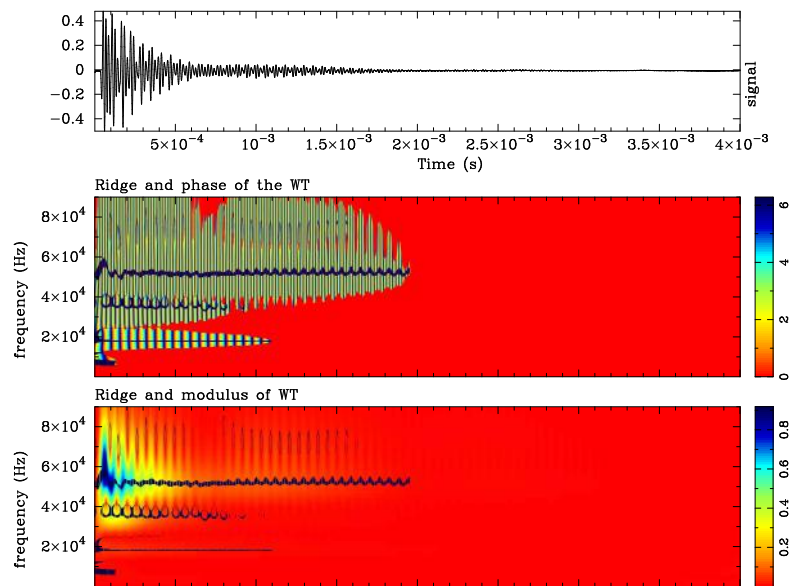


FIGURE 5.2 – *Étude des caractéristiques temporelle et spectrale du transducteur source Boviari ; à gauche : enregistrement de signaux dans l'air pour des distances SR respectivement de 2,5,10 et 20 cm . A droite, spectres correspondants*

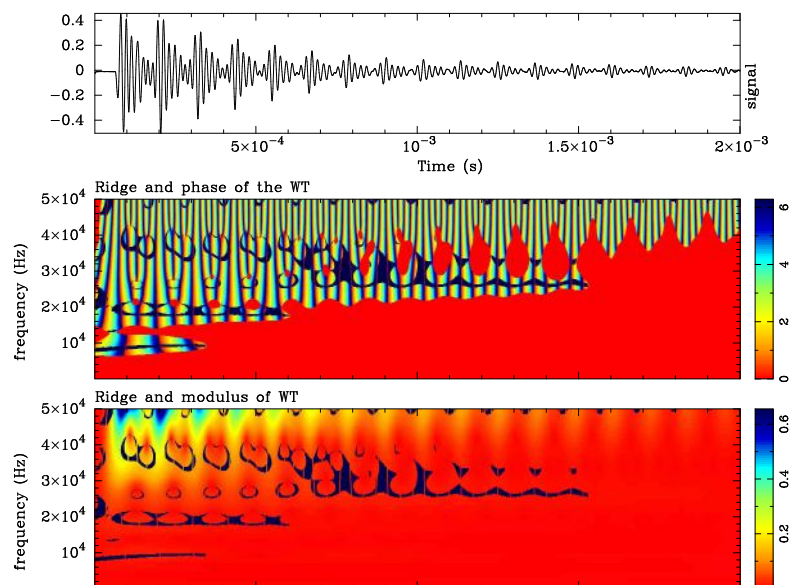
Nous accédons aussi aux propriétés spectrales de la source via la transformée en ondelettes. Ainsi, la figure 5.3 représente le résultat de la transformée avec une ondelette analysante de Morlet appliquée au signal propagé sur une tranche d'air de 5 cm (distance source-récepteur). Nous constatons que le transducteur source produit une onde de fréquence centrale 54 kHz, la plus énergétique en amplitude. A partir de l'analyse du spectre de Fourier, il apparait d'autres fréquences propres dites harmoniques à 39, 20 et 9 kHz. La fréquence fondamentale étant plus énergétique se propage sur une plus longue durée que les harmoniques qui "s'éteignent" plus rapidement.

FIGURE 5.3 – *Résultat de l'analyse en ondelettes complexes (Morlet) du signal source (voie 2, distance $SR = 5$ cm)*



Afin de mieux représenter les lignes spectrales (lignes noires en surbrillance), l'échelle des fréquences est raccourcie (figure 5.4). Dans ce cas, il apparait des battements sur chacune des lignes spectrales. L'origine de ces battements s'explique par le fait que les deux fréquences proches sont contenues dans le signal et qu'il se peut que celles-ci interfèrent. Ces battements constituent une signature caractéristique du milieu traversé.

FIGURE 5.4 – *Résultat de l'analyse en ondelettes complexe (Morlet) du signal de la voie 4 (distance $SR = 5$ cm)*



ii Principe et objectif de la mesure

La mesure en transmission consiste à étudier les propriétés d'un échantillon placé entre un transducteur source et un récepteur de même caractéristique. Une onde de propriétés connues (grâce à la calibration menée précédemment), ici de type impulsionnelle, traversant un milieu matériel subit un ensemble de transformations caractéristiques du milieu traversé. Nous avons choisi d'étudier la propagation de l'onde source sur trois types d'échantillons (figure 5.5) : l'échan-

tillon de plexiglas transparent servant de test (vitesse de propagation connue), un échantillon de sol et différents échantillons de racines.



FIGURE 5.5 – *Mesure en transmission sur des échantillons de différentes natures*

Les échantillons racinaires proviennent de l'extraction de souches d'arbres plantés sur des digues (méthodologie explicitée dans la section 4.1). Ces échantillons présentent une importante diversité en termes de dimension, d'espèce et de temps de décomposition (si on considère l'effet des rejets ou non). Leurs caractéristiques sont détaillées dans le tableau 5.1 ci-dessous.

Echantillon n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Espèce (P : peuplier R : Robinier Ps : Pin Sylvestre)	P	P	P	R	P	P	R	Ps	Ps	R	R	P
Longueur/Diamètre	12-21	8.5-6	3-6	9-18	12-8.5	20-6	4-7	5.5-5	15.5-4.5	2.5-10	5.5-15	8-13
Date de coupe (Rejet)	2008 (oui)	2008 (oui)	2008 (oui)	2008 (oui)	2008 (oui)	2008 (oui)	2008 (oui)	2013 (non)	2008 (oui)	2008 (oui)	2008 (non)	2013 (non)

Tableau 5.1 – *Descriptif des échantillons racinaires utilisés pour les essais en transmission acoustique*

Les transducteurs sont placés de part et d'autre de l'échantillon afin que l'onde incidente se propage dans la direction longitudinale. Dans chacun des cas, la mesure est répétée automatiquement environ 200 fois jusqu'à ce que le rapport signal/bruit se stabilise. Un gel couplant est appliqué sur chaque face de l'échantillon, ce qui permet une adaptation d'impédance et donc une meilleure transmission du signal à travers l'échantillon. Les signaux ainsi obtenus sont enregistrés avec une fréquence d'échantillonnage de 1 MHz sur une durée de 10 ms couvrant la totalité du signal.

A partir de ces enregistrements, il est possible d'extraire des signaux la vitesse de propagation, en déterminant le temps de la première perturbation et l'amplitude RMS du signal. Soit par l'analyse en transformée de Fourier, soit par l'analyse en ondelettes (temps-échelle), les propriétés spectrales et l'évolution du spectre au cours du temps en particulier de la fondamentale sont étudiées. Les spectres sont étudiés dans la gamme de fréquence du transducteur, soit entre 20 et 80 kHz (déterminée de façon empirique à plus ou moins deux fois la moitié autour de la fréquence centrale $54 \text{ kHz} \pm 27 \text{ kHz} = [27-81] \text{ kHz}$).

Notre objectif est de mettre en évidence des signatures caractéristiques qui nous permettent de différencier la réponse d'une racine de celle du sol en vue des prospections in-situ. Nous

ne disposons pas de suffisamment d'échantillons (12) pour les analyser de façon statistique. L'interprétation sera menée à partir des variations relatives des paramètres.

5.2.b Résultats et interprétation

i Propriétés intrinsèques des racines & sols

Vitesse et amplitude RMS

Calcul d'incertitude sur le pointé de l'onde

Le temps d'arrivée du front d'onde (correspondant à la première perturbation, choisie comme négative) est estimé par un pointé manuel. La vitesse est calculée comme le rapport de la longueur de l'échantillon sur le temps d'arrivée. L'analyse de la vitesse doit tenir compte d'incertitudes sur l'appréciation du temps d'arrivée, fixé empiriquement à $\Delta T = 10^{-6}$ s et sur la mesure de la longueur de l'échantillon ($\Delta d = 2$ cm). L'incertitude sur la longueur est prise volontairement grande, la géométrie de certains échantillons n'étant pas parfaitement cylindrique rendant les extrémités non coplanaires.

Nous avons trouvé sur l'échantillon de plexiglas une vitesse identique à la vitesse théorique (indication fabricant). Aussi pour les échantillons de racine analysés à différentes reprises, la mesure des temps de trajets était reproductible et stable.

Représentation de la variabilité des échantillons

La figure 5.6 présente les variations obtenus en considérant tous les échantillons de racines confondus, la vitesse varie entre 700 et 3500 m/s alors que la vitesse de l'échantillon de sol est mesurée à 550 m/s. Par comparaison, la mesure de la vitesse de propagation dans le sol est estimée dans l'expérience de tomographie (section suivante) à 400 m/s.

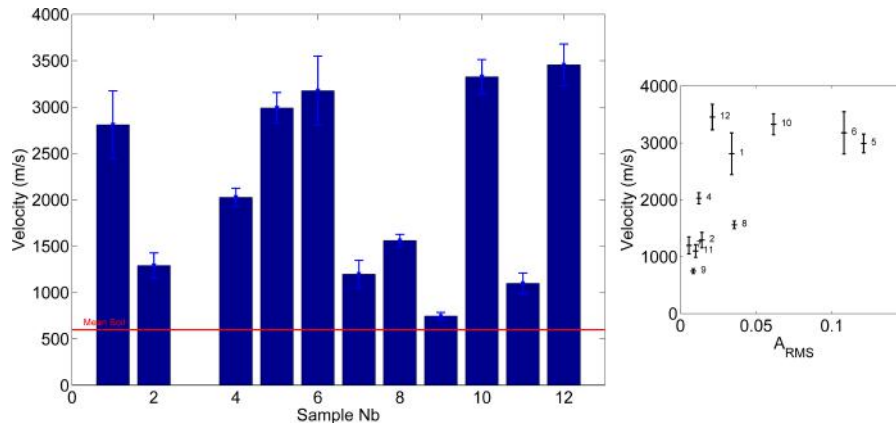


FIGURE 5.6 – A gauche : *histogramme de la vitesse en fonction du numéro d'échantillon*; à droite : *Nuage de points de l'amplitude RMS en fonction de la vitesse*

Bien que nous ne disposons que de peu d'échantillons, la variabilité des vitesses observées semble provenir essentiellement de la masse volumique des échantillons qui est directement proportionnel à l'état de décomposition des racines. Ceci est reporté dans le tableau 5.2 de synthèse des résultats, où par exemple, par comparaison des échantillons n°8 ($\rho = 60$ kg/m³) et n°1 ($\rho = 662$ kg/m³), les vitesses sont respectivement de 1561 m/s et 2810 m/s. L'amplitude (A_{RMS}) montre aussi une variabilité entre les échantillons, pas rigoureusement identique à celle de la vitesse car elle est reliée à la vitesse par une relation non-linéaire. Une tendance se dégage à savoir que lorsque la vitesse augmente, l'amplitude de l'onde est plus élevée. Si l'amplitude est plus importante, cela signifie que le milieu est peu dispersif et plus homogène et par conséquent

que l'onde est moins atténuée par les hétérogénéités. De plus, lorsque la propagation est moins perturbée, la vitesse de l'onde est plus grande.

Analyse spectrale et temps-échelle

Nous représentons, en plus de l'échantillon de sol (figure 5.7), le résultat de deux échantillons racinaires pour lesquels les vitesses de propagation sont la plus élevée (3455 m/s, échantillon 12, figure 5.9) et la plus faible (746 m/s, échantillon 9, figure 5.8).

Pour l'étude du spectre, les signaux sont d'abord filtrés dans la gamme de fréquences des transducteurs afin d'éviter les effets basses fréquences indésirables. Le filtre appliqué est un passe haut (de type Butterwoth) ayant pour fréquence de coupure 10^4 Hz. Pour l'analyse temps-échelle, les signaux sont analysés bruts. L'analyse est systématiquement réalisée avec une ondelette analysante de Morlet (i.e une gaussienne modulée), bien localisée à la fois en temps et en fréquence. Cette ondelette complexe permet d'obtenir deux fonctions complémentaires : le module et la phase des coefficients.

Les échantillons étant de longueurs différentes, il n'est pas directement possible de comparer les amplitudes des différentes lignes spectrales. Dans cette expérience, l'échantillon de sol est systématiquement de longueur plus petite par rapport aux échantillons racinaires. Les spectres présentés sur les figures 5.7b, 5.8b et 5.9b qui suivent permettent d'observer les variations de la position de la fréquence des lignes spectrales principales. L'analyse en ondelettes (figures 5.7a, 5.8a et 5.9a) permet d'étudier les temps d'apparition et d'extinction de chacune de ces lignes spectrales.

Échantillon de sol

Sur la figure 5.7, nous constatons qu'à travers l'échantillon de sol, plusieurs lignes spectrales sont visibles dans la gamme de 10 kHz à 90 kHz. La fréquence la plus énergétique est centrée à 55 kHz, soit la fréquence centrale du transducteur. Quelques battements réguliers de plus ou moins 0,5 kHz apparaissent. D'autres lignes spectrales moins visibles sont détectées à 50,40 et 20 kHz. Enfin, en deçà de 1 kHz, un recouvrement des lignes spectrales est visible au temps d'arrivée de l'onde. Aux temps longs ces lignes spectrales sont bien distinctes (1 kHz et 0,92 kHz).

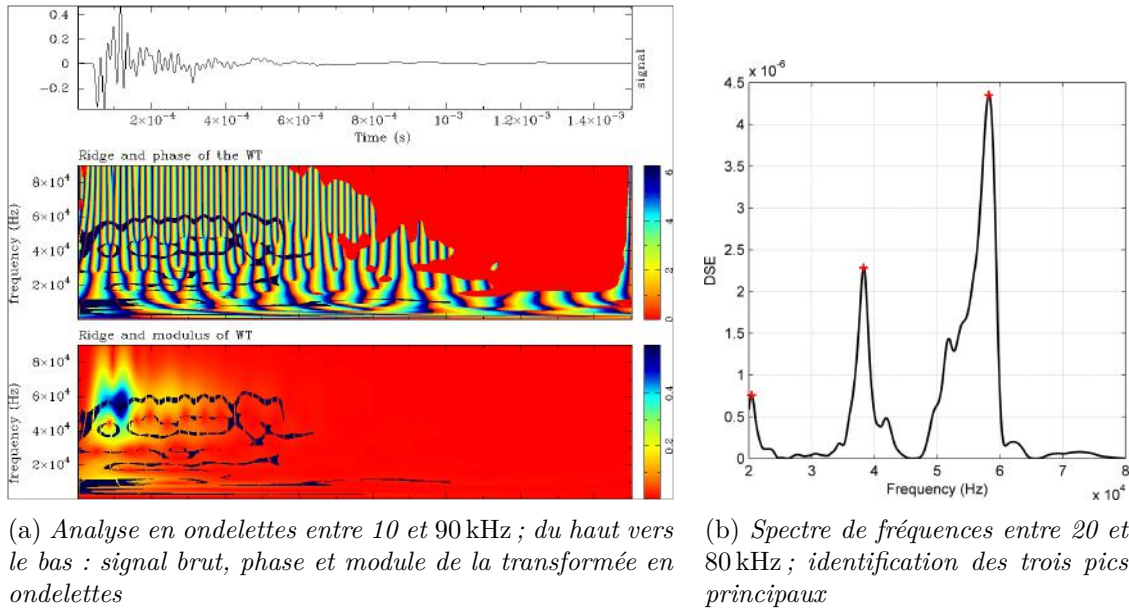


FIGURE 5.7 – Analyse temps-échelle (5.7a) et spectrale (5.7b) de l'échantillon de sol ; vitesse = 552 m/s ; amplitude RMS = $2,3 \times 10^{-2}$ V ; longueur-diamètre = 6-5 cm

Échantillons racinaires 9 et 12

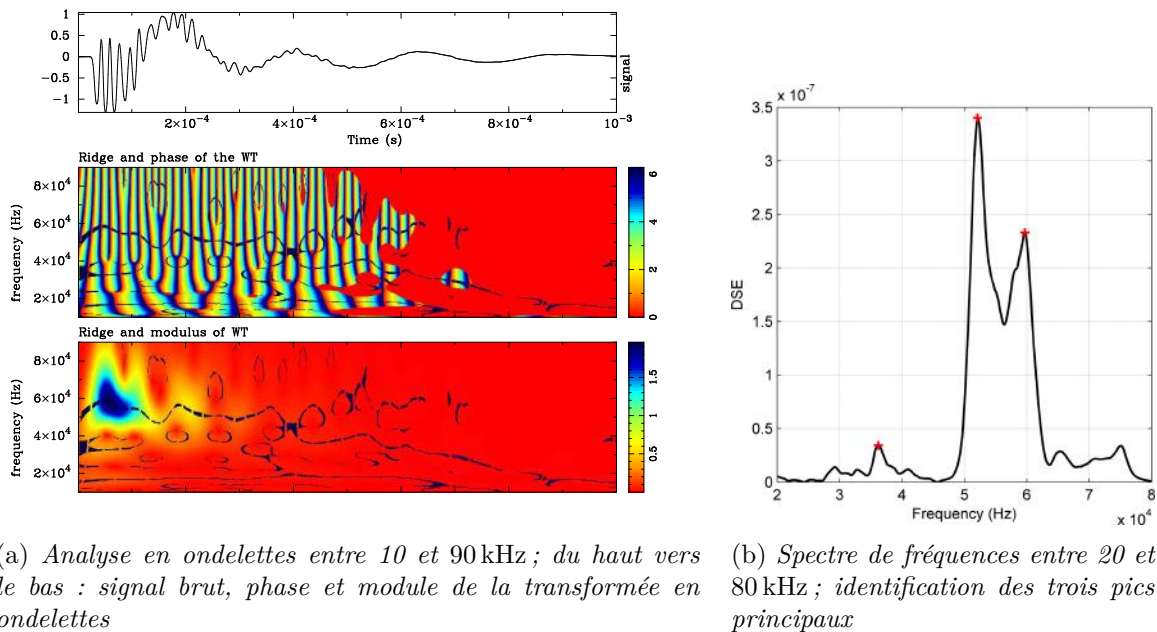
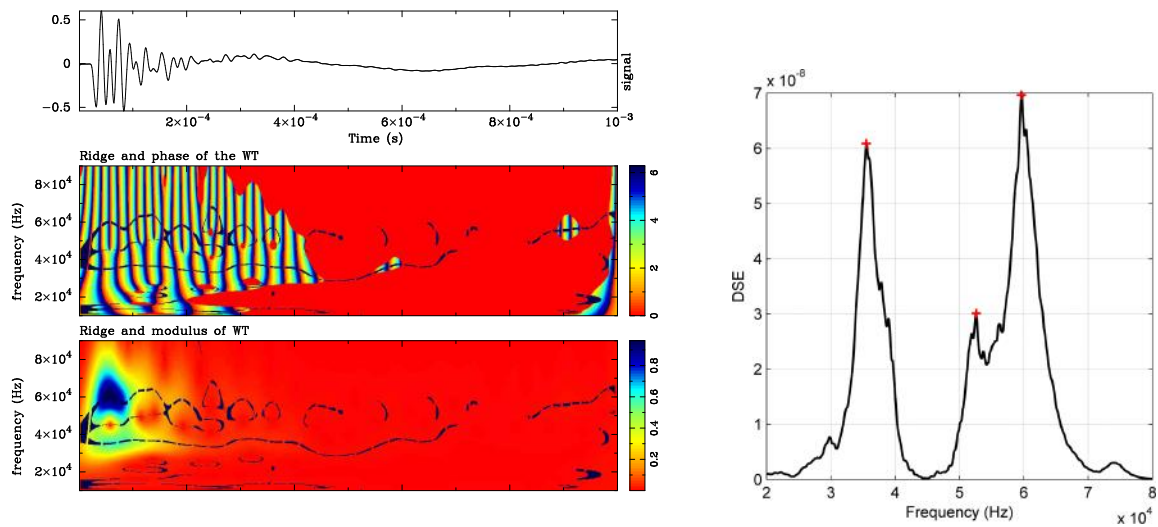


FIGURE 5.8 – Analyse temps-échelle (5.8a) et spectrale (5.8b) de l'échantillon racinaire 9 ; vitesse = 746 m/s ; amplitude RMS = $8,5 \times 10^{-3}$ V ; longueur-diamètre = 15.5-4,5 cm

A partir de l'échantillon racinaire 9 (figure 5.8), nous obtenons un spectre sur lequel nous identifions trois pics principaux. Dans cette gamme, la fréquence fondamentale est située à 52 kHz, alors que la seconde ligne spectrale est située à approximativement 60 kHz. Nous distinguons moins nettement une troisième fréquence de propagation à 37 kHz. D'après la transformation en ondelette, le mode principal est maintenu sur toute la durée du signal, alors que les

lignes spectrales secondaires se manifestent moins nettement, plutôt par des battements issus d'interférences (visuellement représentées par des ellipses).



(a) Analyse en ondelettes entre 10 et 90 kHz ; du haut vers le bas : signal brut, phase et module de la transformée en ondelettes

(b) Spectre de fréquences entre 20 et 80 kHz ; identification des trois pics principaux

FIGURE 5.9 – Analyse temps-échelle (5.9a) et spectrale (5.9b) de l'échantillon racinaire 12 ; vitesse = 3455 m/s ; amplitude RMS = $2,11 \times 10^{-3}$ V ; longueur-diamètre = 8-13 cm

A partir de l'échantillon racinaire 12 (figure 5.9), nous obtenons deux principaux pics situés dans l'ordre des amplitudes décroissantes respectivement à 60 et 36 kHz et un troisième pic situé à proximité de la fréquence fondamentale à approximativement 52 kHz. Chacune de ces lignes spectrales prend naissance à l'arrivée de l'onde et se conserve tout au long du signal. Nous observons également un phénomène d'interférences entre la fréquence fondamentale et le troisième mode identifié sur le spectre.

Sur la transformée en ondelettes des oscillations caractéristiques d'un milieu dispersif sont observées alors que pour le milieu de référence la ligne spectrale est plutôt stable. Cette caractéristique semble pouvoir être une signature permettant de distinguer le signal issu de la propagation dans le sol de celui de la racine.

L'étude des spectres issus des autres échantillons montre systématiquement deux pics principaux. En toute logique, quel que soit l'échantillon, les pics relevés sont proches des fréquences propres (fondamentale et harmoniques à 54, 39, 20, 9 kHz) de la source mis en évidence lors de la calibration. Sur des échantillons de relativement petite taille, la position en fréquence de la fondamentale et des lignes spectrales secondaires varient peu autour des fréquences propres de la source.

Synthèse des essais en transmission

Au cours de cette étude, des biais expérimentaux se manifestent. En effet, en travaillant sur des échantillons bruts, la surface sur laquelle les transducteurs sont en contact n'est pas parfaitement plane. Pour améliorer le couplage, il serait préférable de réaliser des essais avec des échantillons immergés dans l'eau mais les transducteurs ne le permettent pas. Malgré cette limitation, des tendances apparaissent et il semble possible de déduire les variations des

quantités physiques mesurées en fonction des différentes natures des échantillons examinés.

A la fois la vitesse et l'amplitude apparaissent comme des quantités physiques pertinentes pour la discrimination des racines d'un sol. Néanmoins, dans certains cas, les vitesses dans le sol et les racines peuvent être sensiblement identiques particulièrement lorsque les propriétés intrinsèques de la racine ne sont pas favorables (variations de teneur en eau, décomposition avancée).

Dans ce cas, on a recours à l'analyse spectrale, temps-fréquence ou temps-échelle comme analyse additionnelle de discrimination. Toutefois, du fait de la petite longueur des échantillons, les caractéristiques spectrales sont modifiées mais le sens des modifications n'est pas identifié. Par conséquent, les différences entre les spectres de sol et de racines observées ne semblent pas être significatives. Néanmoins, sur la transformée en ondelettes des oscillations caractéristiques d'un milieu dispersif sont observées alors que pour le milieu de référence montrer des fréquences propres (les lignes spectrales étant stables).

En première approximation et en normalisant par la taille des échantillons il semble que les racines portent moins bien les fréquences de l'ordre de 50 kHz. Ceci demande à être vérifié lors de l'expérience en tomographie.

Le tableau 5.2 synthétise les résultats à partir du calcul des impédances acoustiques. L'impédance acoustique d'un milieu pour une onde acoustique caractérise la résistance du milieu au passage de cette onde. En pratique, définir leurs valeurs minimales et maximales, permet aussi d'en déduire les valeurs des coefficients de réflexion et transmission à l'interface sol-racine. Ainsi on pourra estimer l'énergie transmise à la racine pour s'y propager vers le tronc.

Echantillon n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
V_l (m/s)	2810	1292	x	2027	2991	3177	1199	1561	746	3327	1099	3455
ρ (kg/m ³)	662	424	142	294	x	279	398	60	87	199	230	339
Z_a (Pa s/m)	$1.9 \cdot 10^6$	$5.5 \cdot 10^5$	x	$6 \cdot 10^5$	x	$8.9 \cdot 10^5$	$4.8 \cdot 10^5$	$9.4 \cdot 10^4$	$6.5 \cdot 10^4$	$6.6 \cdot 10^5$	$2.5 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^6$

Tableau 5.2 – Synthèse des paramètres caractéristiques mesurés (V_l : vitesse, ρ : masse volumique) lors d'essais en transmission et calculés (Z_a : Impédance acoustique)

Plus les impédances acoustiques entre l'anomalie racinaire recherchée et le sol encaissant diffèrent, plus les coefficients de réflexion à l'interface seront élevés. Au contraire, si les impédances sont sensiblement identiques alors l'énergie sera préférentiellement transmise. Il est difficile de donner des valeurs d'impédance de sols, celles-ci étant influencées par de nombreux paramètres (teneur en eau, compaction, pourcentage d'argile). A titre indicatif, d'après [Arnott et al. \(2002\)](#), l'impédance acoustique d'un sable limoneux est le produit d'une gamme de densité entre 1.7 et 2, pour une vitesse entre 1500 et 2000 m/s (fréquence de mesure non précisée). L'impédance acoustique d'un sable limoneux est approximativement de $2,5 \times 10^6$ et 4×10^6 Pa s/m donc en moyenne plus élevée que celle obtenue à partir de nos échantillons racinaires.

Dans le cas d'une incidence normale, on obtient les coefficients de réflexion suivants :

$R_{max} = 0,95$ et $R_{min} = 0,13$. R_{max} est calculé à partir de l'impédance théorique maximale du sol et minimale (obtenue expérimentalement) de la racine sur l'ensemble des échantillons.

R_{min} est calculé à partir de l'impédance théorique minimale du sol et maximale (obtenue expérimentalement) de la racine sur l'ensemble des échantillons. L'effet de ces valeurs sur les différents chemins de propagation sera discuté dans la conclusion de ce chapitre (cf. 5.4). Dès à présent, la gamme des coefficients possibles étant grande, il est compliqué de postuler sur le

contraste d'impédance acoustique existant entre la racine et le sol environnant et par conséquent sur le potentiel de discrimination.

5.2.c Mesure en tomographie

i Principe de la mesure

Un dispositif intermédiaire reproduisant des conditions in-situ en laboratoire est conçu à l'aide de deux cuves en plexiglas. Une cuve de contrôle (longueur 50 cm, hauteur 50 cm) est remplie avec 35 cm de sol, tandis que dans une cuve similaire, un échantillon de racine (diamètre 6 cm, longueur 20 cm) est enterré à 6 cm de profondeur et horizontalement (sans pendage) (figure 5.10). Un échantillon de peuplier (*Populus alba*), précédemment analysé en transmission (échantillon n°6), est utilisé pour cette expérience.

Le sol des cuves est dans un premier temps saturé en eau, jusqu'à ce qu'une fine couche d'eau soit visible à la surface du sol. Cette étape permet de travailler dans des conditions identiques de compaction et de teneur en eau dans les deux cuves. Les mesures sont réalisées une semaine après. La teneur en eau a été estimée en utilisant une sonde de mesure TDR (Time Domain Reflectometry, avec un WET-2- Sensor DeltaT Devices) à approximativement 15% de teneur en eau volumique.

Les mesures de tomographie sont réalisées à la surface des cuves, en utilisant quatre récepteurs et une source alignés, dans un premier temps parallèlement puis perpendiculairement à la direction de la racine. Lors de chaque acquisition, le transducteur source est situé au début du profil et les quatre récepteurs sont espacés de 5, 10, 15 and 20 cm de la source (distance source récepteur D_{SR_i}). La position de la source est déplacée, par pas de 5 cm, vers le centre de la cuve. Le tableau 5.3 récapitule l'ensemble des couples positions récepteurs de la tomographie.

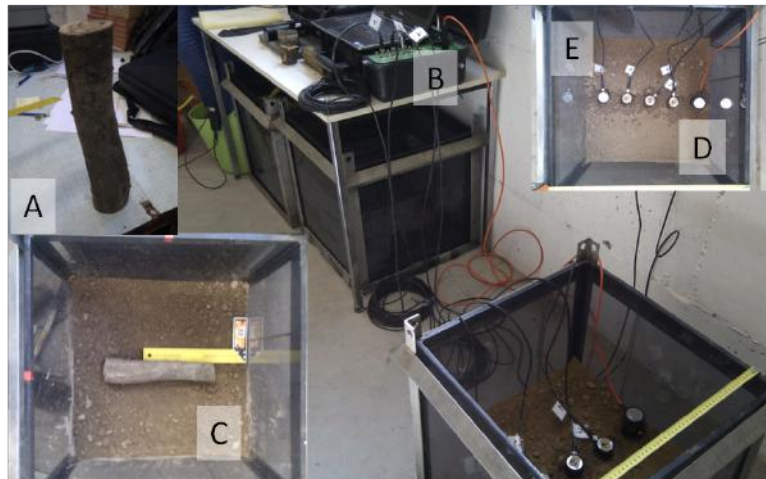


FIGURE 5.10 – *Dispositif expérimental pour l'étude en tomographie ; A - échantillon racinaire sélectionné (préalablement mesuré en transmission) pour être enterré - B : branchements des 4 voies de réception sur le TDA16 - C : positionnement central de la racine avant d'être enterrée - D : position du transducteur source (fil orange) en déport par rapport aux transducteurs de réception - E : ligne de transducteurs de réceptions espacés à intervalles Δx réguliers*

La racine enterrée agit comme un réflecteur potentiel au cours de la propagation de l'onde transmise. Les résultats sont exprimés en coordonnées X,Y,Z de collection de points de réflexion (CDP : Common Depth Point), avec XY le plan horizontal défini par la surface du sol et Z

Configuration	Nom mesure			Cuve	Capteur source			Capteur réception				Distance			
	Xs	Ys	Xs		Y1r	X2r	Y2r	X3r	Y3r	X4r	Y4r	D1	D2	D3	D4
Cuve terre racine longitudinale	1	0.1	0.25	L	0.15	0.25	0.2	0.25	0.25	0.3	0.25	0.05	0.1	0.15	0.2
	2	0.1	0.25	L	0.25	0.25	0.3	0.25	0.35	0.4	0.25	0.15	0.2	0.25	0.3
Cuve terre racine transversale	3	0.15	0.25	L	0.25	0.25	0.3	0.25	0.35	0.4	0.25	0.1	0.15	0.2	0.25
	4	0.2	0.25	L	0.25	0.25	0.3	0.25	0.35	0.4	0.25	0.05	0.1	0.15	0.2
	5	0.2	0.25	L	0.3	0.25	0.35	0.4	0.25	0.45	0.25	0.1	0.15	0.2	0.25
	6	0.2	0.25	L	0.3	0.25	0.35	0.4	0.25	0.45	0.25	0.05	0.1	0.15	0.2
	7	0.25	0.25	L	0.25	0.15	0.25	0.2	0.25	0.25	0.3	0.05	0.1	0.15	0.2
	8	0.25	0.1	T	0.25	0.25	0.25	0.3	0.25	0.35	0.25	0.4	0.15	0.2	0.25
	9	0.25	0.1	T	0.25	0.25	0.25	0.3	0.25	0.35	0.25	0.4	0.15	0.2	0.25
	10	0.25	0.15	T	0.25	0.25	0.25	0.3	0.25	0.35	0.25	0.4	0.1	0.15	0.2
	11	0.25	0.2	T	0.25	0.25	0.25	0.3	0.25	0.35	0.25	0.4	0.05	0.1	0.15
Cuve terre référence	12	0.25	0.2	T	0.25	0.3	0.25	0.35	0.25	0.4	0.25	0.45	0.1	0.15	0.2
	13	0.25	0.25	T	0.25	0.3	0.25	0.35	0.25	0.4	0.25	0.45	0.05	0.1	0.15
	14	0.1	0.25	R	0.15	0.25	0.2	0.25	0.25	0.3	0.25	0.05	0.1	0.15	0.2
	15	0.1	0.25	R	0.25	0.25	0.3	0.25	0.35	0.25	0.4	0.25	0.15	0.2	0.25
	16	0.15	0.25	R	0.25	0.25	0.3	0.25	0.35	0.25	0.4	0.25	0.1	0.15	0.2
	17	0.2	0.25	R	0.25	0.25	0.3	0.25	0.35	0.25	0.4	0.25	0.05	0.1	0.15
	18	0.2	0.25	R	0.3	0.25	0.35	0.25	0.4	0.25	0.45	0.25	0.1	0.15	0.2
	19	0.25	0.25	R	0.3	0.25	0.35	0.25	0.4	0.25	0.45	0.25	0.05	0.1	0.15

Tableau 5.3 – *Tableau de synthèse des positions source-récepteurs lors de l'expérience de tomographie ultrasonique en cuve*

la profondeur. Empiriquement pour un sol homogène, les coordonnées des CDP sont définies d'après les relations suivantes :

$$X_{CDP_i} = (X_S + X_{R_i})/2$$

$$Z_{CDP_i} = \|D_{SR_i}\|/2$$

D_{SR} (cm)	5	10	15	20
Z	2.5	5	7.5	10

Tableau 5.4 – Équivalence distance source-récepteur D_{SR} avec la profondeur d'investigation théorique Z

Les correspondances entre la distance source-récepteur D_{SR} et la profondeur d'investigation théorique sont reportées dans le tableau 5.4. Le coefficient de réflexion théorique d'après les essais en transmission est situé entre 47 et 63% (calculé à partir de la vitesse obtenue pour l'échantillon de racine n°6). La distance entre récepteurs est le double de la distance entre CDP en sub-surface. Celle-ci est en fait la résolution horizontale finale attendue. En ce sens, le nombre des points de mesures ayant pour coordonnées de CDP la position de la racine, permet de considérer qu'une couverture multiple est assurée sur le réflecteur.

5.2.d Résultats et interprétation

i Effets d'un échantillon de racine enterré sur la vitesse (V) et l'amplitude RMS (A_{RMS})

Les vitesses de propagation pour le dispositif en tomographie présentées ici sont calculées sous l'hypothèse d'un milieu homogène dans les deux cuves. Les amplitudes sont quant à elles non corrigées du facteur géométrique (distance source-récepteur) afin de mieux rendre compte de la présence de la racine sur l'atténuation de l'onde.

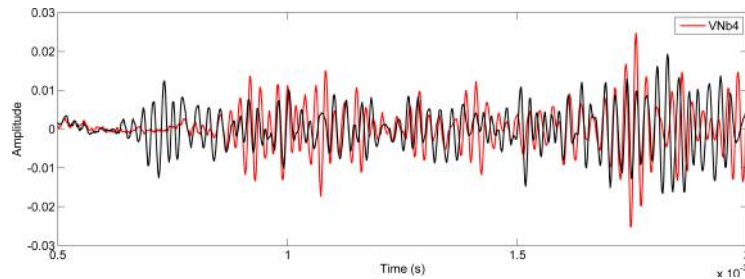


FIGURE 5.11 – Comparaison des signaux ($Y_{CDP} = 0,25$ m et $D_{SR} = 20$ cm) entre la cuve avec racine longitudinale (noire) et la cuve de référence (rouge)

D'après la figure 5.12, l'amplitude A_{RMS} montre une diminution régulière avec l'augmentation de la distance (exceptée pour la voie 3, D_{SR_3}), mais pas de différences significatives entre les cuves quelle que soit la direction d'acquisition.

Dans la cuve de référence, les vitesses sont stables, en moyenne de 400 m/s, quelle que soit D_{SR_i} . Au contraire, dans la cuve avec un échantillon enterré, plus D_{SR_i} est grand, plus la vitesse est grande. Les variations les plus importantes de vitesse sont visibles pour $D_{SR_i} = 20$ cm (i.e. $Z_{CDP} = 10$ cm). La figure 5.11 montre une nette différence des temps d'arrivée entre les signaux entre les deux cuves. Dans ce cas, la vitesse est approximativement deux fois plus élevée et proche

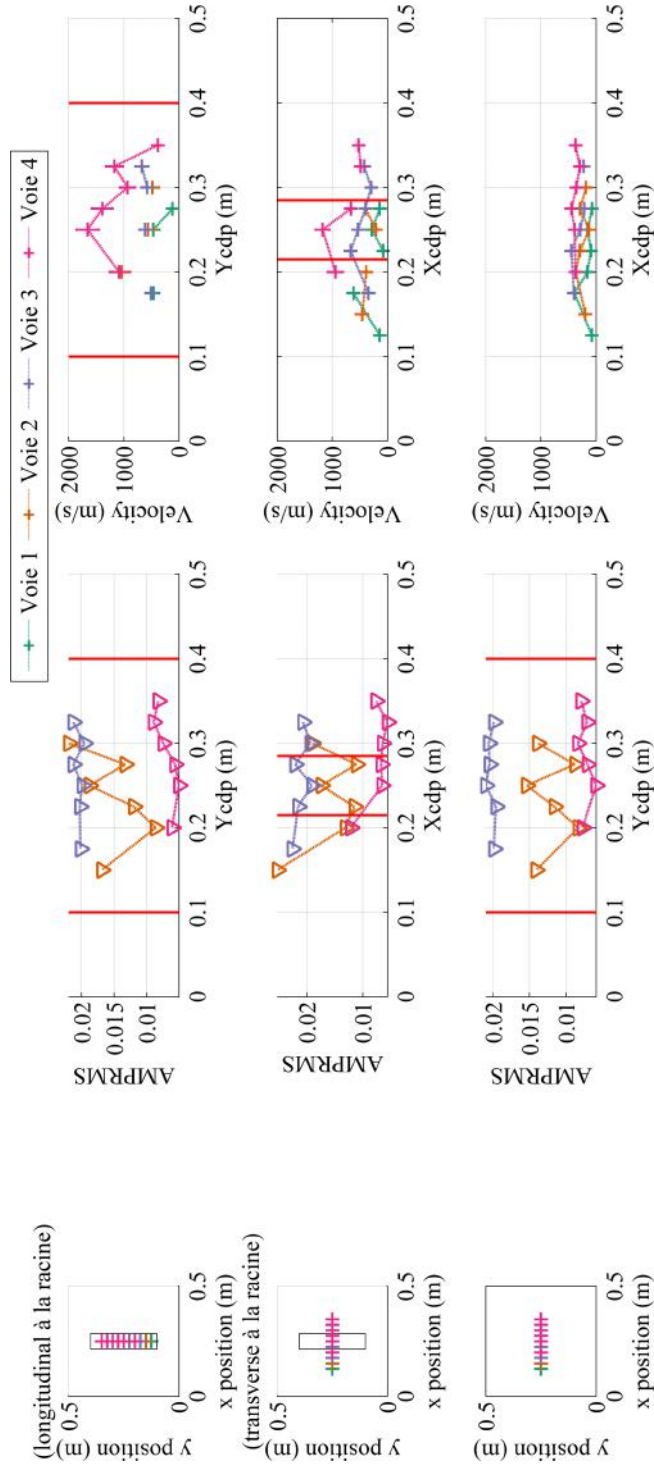


FIGURE 5.12 – Comparaison des amplitudes RMS (Volts) de propagation obtenues dans la cuve avec racine (transversalement) puis parallèlement et dans la cuve de sol seul en fonction de la position x, y et z de la réflexion

des valeurs obtenues sur l'échantillon de racine seul (numéro 6, $V = 2800$ m/s), mais néanmoins plus faible car la propagation intègre le sol. Cette observation est en accord avec la profondeur ($Z = 6$ cm) à laquelle la racine se situe. L'augmentation de la vitesse est plus visible sur le profil parallèle, où tous les CDP sont localisés dans la zone racinaire.

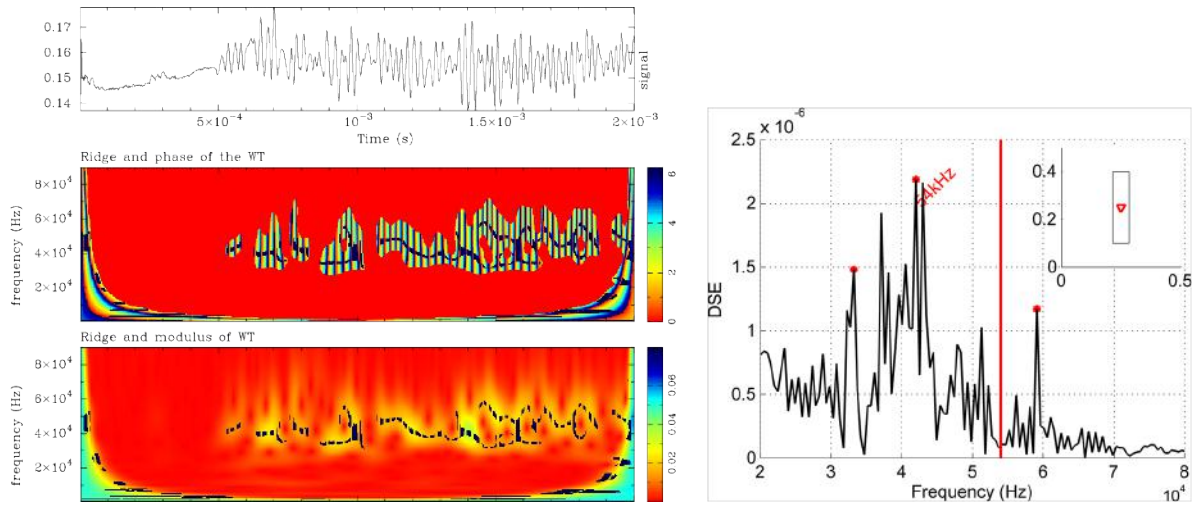
ii Effets d'un échantillon de racine enterré sur les paramètres spectraux : f_{max} et $A_{f_{max}}$

Dans un souci de clarté, nous présentons le résultat pour lequel nous avons identifié préalablement les variations les plus significatives de vitesse de propagation, à savoir les signaux issus de la position $Y_{CDP} = 0,25$ m et de la distance $D_{SR} = 20$ cm. Une comparaison est réalisée afin de mettre en évidence l'effet de la direction d'acquisition (anisotropie de direction) et de la présence de racine.

Contrairement à l'étude en transmission où l'interprétation est réalisée uniquement sur les variations de la position du pic de la fréquence fondamentale (les échantillons étant de longueurs différentes), il est possible de comparer dans ce cas les amplitudes des spectres car la distance entre source-récepteurs est fixe ($D_{SR} = 20$ cm). La comparaison est réalisée à partir des signaux issus du point de réflexion au centre de la cuve, correspondant à la position où le maximum de différence de vitesse a été observé entre les deux cuves.

Cuve avec échantillon de racine - $X_{CDP}, Y_{CDP} = (0.25, 0.25)$ - Direction longitudinale

La figure 5.13 représente le résultat de la mesure réalisée dans la direction longitudinale.



(a) Analyse en ondelettes entre 10 et 90 kHz ; du haut vers le bas : signal brut, phase et module de la transformée en ondelettes

(b) Spectre de fréquences entre 20 et 80 kHz ; le trait vertical rouge correspond à la fréquence centrale du transducteur source ; identification des trois pics principaux

FIGURE 5.13 – Analyse temps-échelle (5.13a) et spectrale (5.13b) du signal issu de la cuve avec l'échantillon de racine pour l'acquisition dans la direction longitudinale ; vitesse = 1176 m/s ; amplitude RMS = $6,5 \times 10^3$ V ; voie 4

Cuve avec échantillon de racine - $X_{CDP}, Y_{CDP} = (0.25, 0.25)$ - Direction transversale

La figure 5.14 représente le résultat de la mesure réalisée dans la direction transversale.

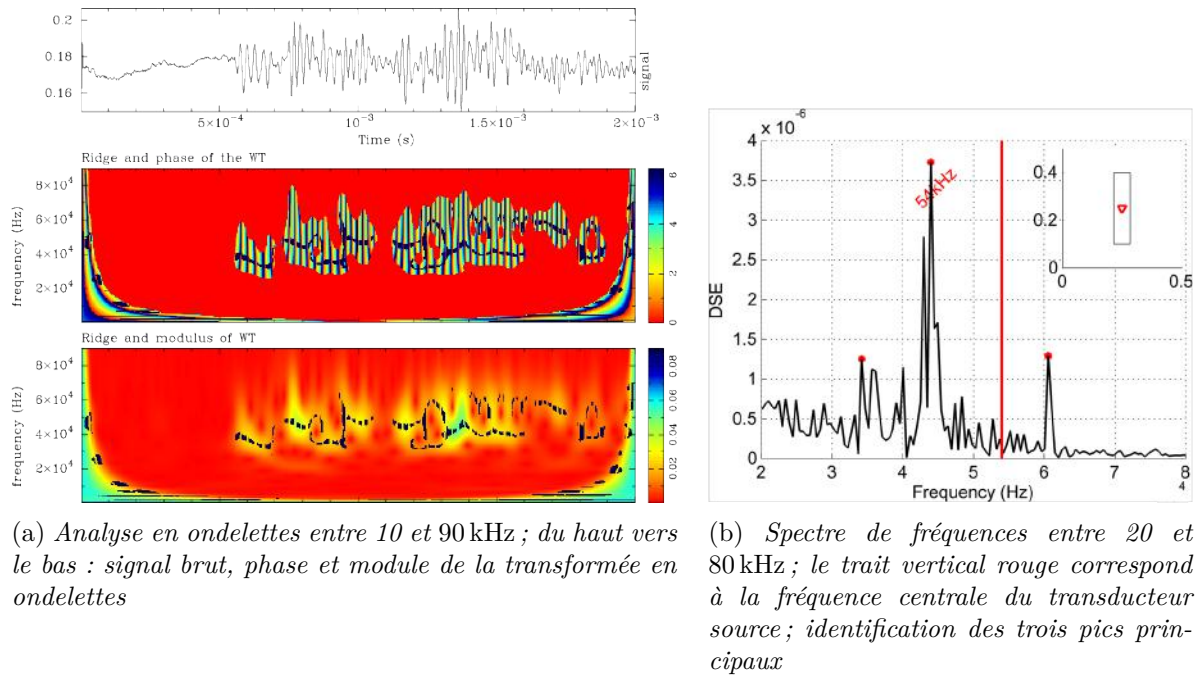


FIGURE 5.14 – Analyse temps-échelle (5.14a) et spectrale (5.14b) du signal issu de la cuve avec l'échantillon de racine pour l'acquisition dans la direction transversale ; vitesse = 1637 m/s ; amplitude RMS = $5,05 \times 10^3$ V ; voie 4

Cuve de référence

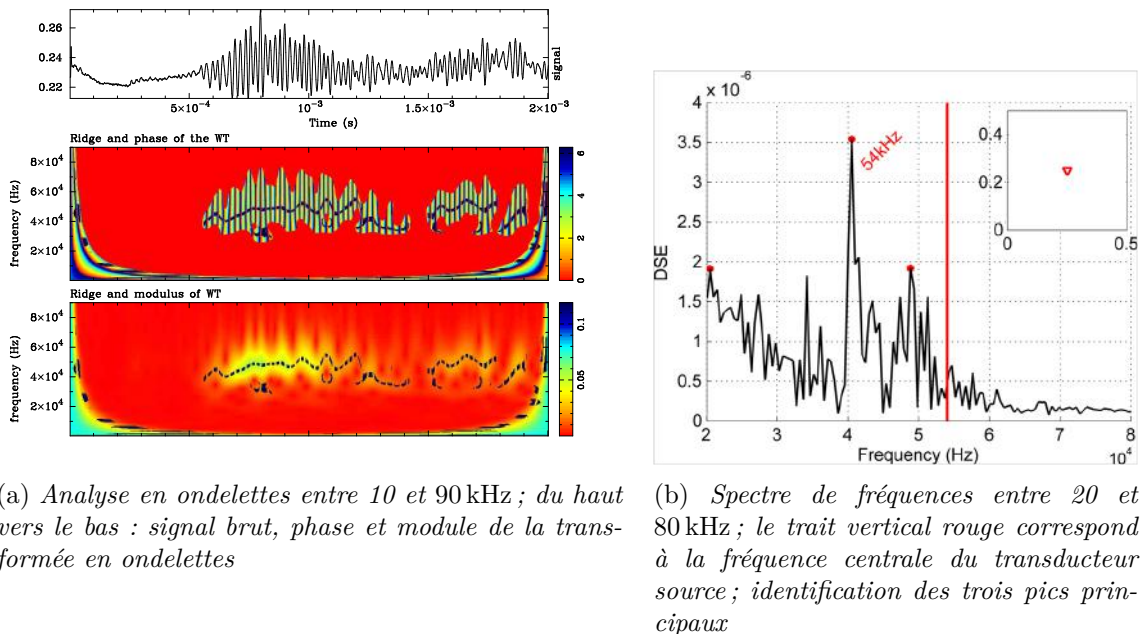


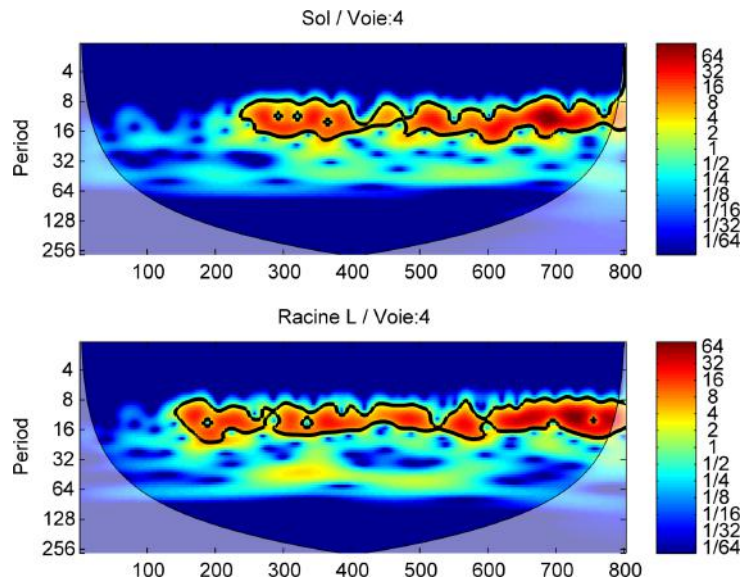
FIGURE 5.15 – Analyse temps-échelle (5.15a) et spectrale (5.15b) du signal issu de la cuve de référence ; vitesse = 388 m/s ; amplitude RMS = $5,9 \times 10^3$ V ; voie 4

Contrairement aux essais en transmission, les positions des fréquences des lignes spectrales obtenues ne sont plus identiques aux fréquences propres générées par la source. Ceci peut

s'expliquer en partie par la conversion des modes lors des phénomènes de réflexion et réfraction qui se produisent nécessairement dans cette expérience. Dans chacun des cas, quelle que soit la cuve, la fréquence fondamentale est située à 42 kHz et n'est plus celle du transducteur source (54 kHz). L'apparition de la fréquence fondamentale sur l'analyse temps-fréquence coïncide avec le temps d'arrivée de la première perturbation. L'amplitude de la DSE (densité spectrale d'énergie) de la fondamentale dans la cuve de référence ($3,5 \times 10^3$, figure 5.15b) est similaire à celle dans la cuve contenant une racine disposée longitudinalement à la mesure ($3,6 \times 10^3$, Fig.5.13b). L'étude spectrale permet de mettre en évidence une fréquence, correspondant à un mode de propagation secondaire à 60 kHz, existant uniquement sur les signaux de la cuve contenant la racine. D'après l'analyse en ondelettes, cette fréquence semble arriver plus tardivement dans le train d'onde du signal, approximativement à $3,6 \times 10^3$ s.

L'analyse en ondelettes rend compte des différences de temps d'arrivée des ondes. Ainsi à partir de la figure 5.16, il apparaît que l'énergie du mode de propagation principal arrive bien avant en temps pour la cuve dans laquelle est située l'échantillon de racine. Cette analyse vient réduire l'incertitude sur le pointé de l'onde et donc augmenter la robustesse des différences de vitesse observées en présence ou non de racine. Elle pourra être utilisée pour mieux identifier les temps d'arrivée lors d'acquisitions in-situ.

FIGURE 5.16 – Résultats de l'analyse en ondelettes de Gauss et comparaison des transformées en fonction de la cuve à la position $X_{CDP}, Y_{CDP} = (0.25, 0.25)$



Corrélation croisée d'ondelettes

Afin de mieux rendre compte des similarités ou différences entre les signaux dans le domaine spectral, les figures 5.17 et 5.18 présentent les résultats de la corrélation croisée de chaque ondelette déterminée individuellement. En traitement du signal, la corrélation croisée (aussi appelée covariance croisée) est la mesure de la similitude entre deux signaux : une forte amplitude de la corrélation (rouge sur l'échelle de couleur adoptée) signifie que les signaux sont similaires. Deux types de corrélation d'ondelettes sont réalisées :

1. Corrélation entre la transformée en ondelettes du signal en transmission issu de la racine (sélectionnée puis enterrée) et la transformée de ceux issus des différentes cuves ;
2. Corrélation entre la transformée en ondelettes d'une sinusoïde composée de trois fréquences et la transformée en ondelettes des signaux issus des cuves avec et sans racine.

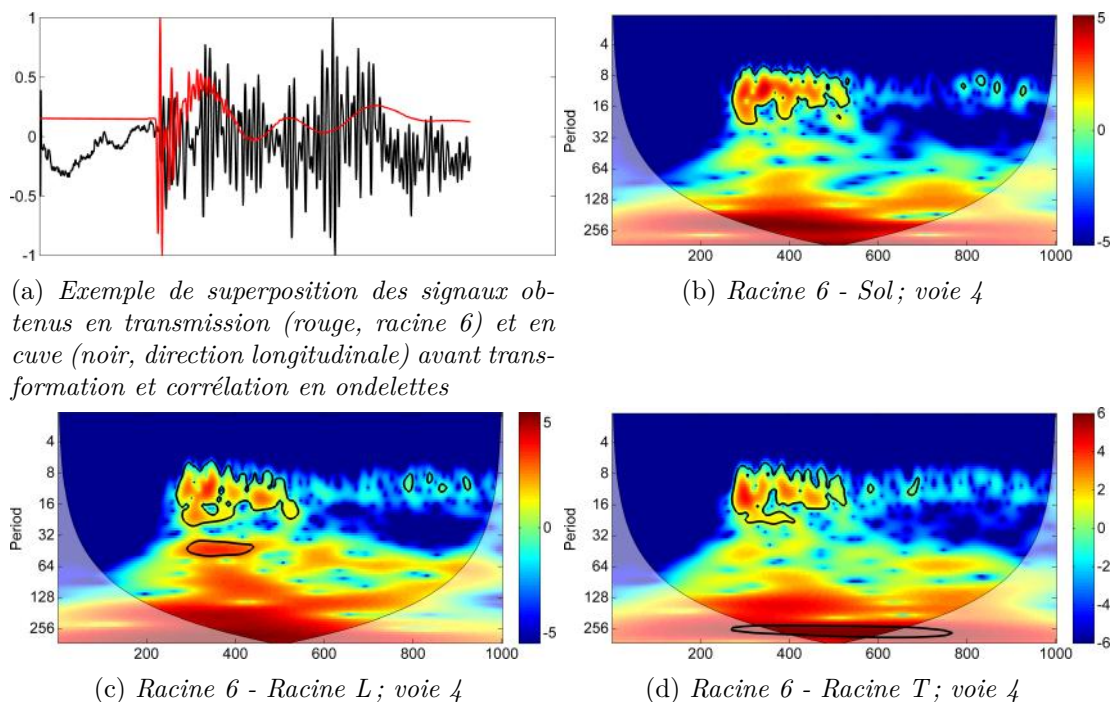


FIGURE 5.17 – Résultats de la corrélation croisée des transformations à partir d’une ondelette de Gauss des mesures en cuve de référence et contenant la racine (n° 6) avec le signal obtenu sur la mesure en transmission (racine ° 6)

Avant de réaliser la corrélation croisée des ondelettes, les temps d’arrivée entre les signaux issus de la transmission et ceux issus de l’expérience en cuve sont ajustés afin de les comparer. La corrélation croisée des ondelettes est réalisée directement à partir des signaux bruts. Nous constatons clairement une onde de basse fréquence qui porte une onde de plus haute fréquence. Pour chacune des comparaisons (5.17b, 5.17c, 5.17d), la corrélation est forte entre les périodes de 8 à 16s correspondant à une fréquence approximativement comprise entre 50 et 60 kHz. D’autres corrélations apparaissent à plus basses fréquences, uniquement à partir des signaux issus de la cuve avec racine. Pour la direction longitudinale, la corrélation avec l’échantillon de racine se situe à environ 15 kHz (période de 32), alors que pour la direction transversale, la corrélation est encore plus basse fréquence autour de 1 kHz (environ 128 de facteur période). Les basses fréquences étant plus énergétique, il est possible que des corrélations existent aussi au delà de 54 kHz, mais celles ci sont cachées par des effets d’échelles.

L’étude de la corrélation avec une sinusoïde portant trois fréquences caractéristiques 24 kHz correspond à la fréquence centrale des transducteurs de marque Sofranel (utilisés uniquement pour l’expérience in-situ), 54 kHz la fréquence centrale des transducteurs de marque Boviar (utilisés pour cette expérience) et 84 kHz une fréquence plus haute à la limite supérieure de la gamme théorique des capteurs permet de trouver d’autres critères de discrimination sol/racine.

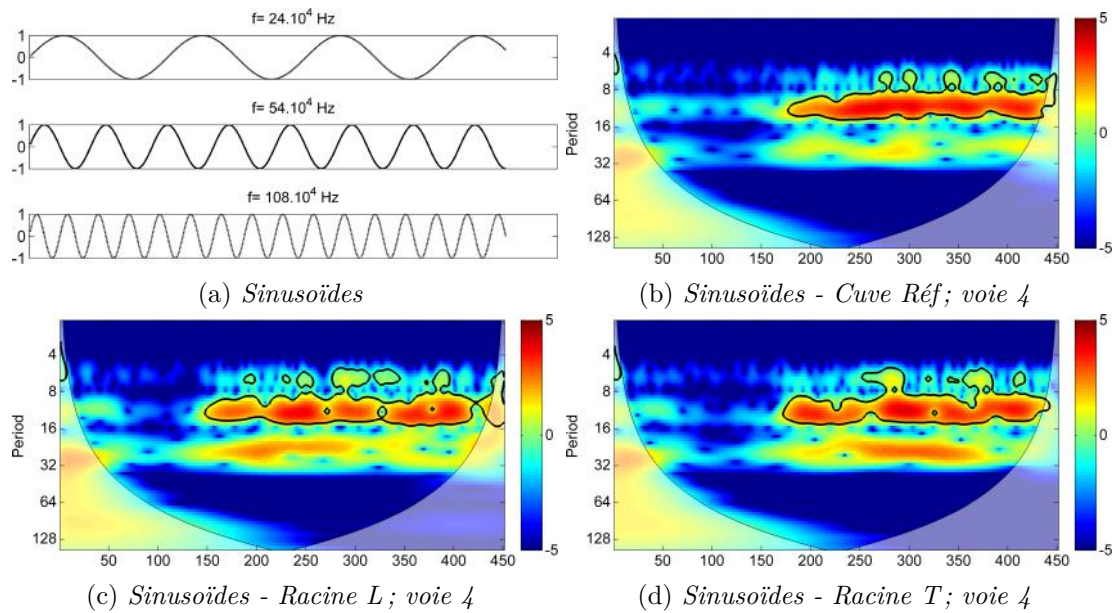
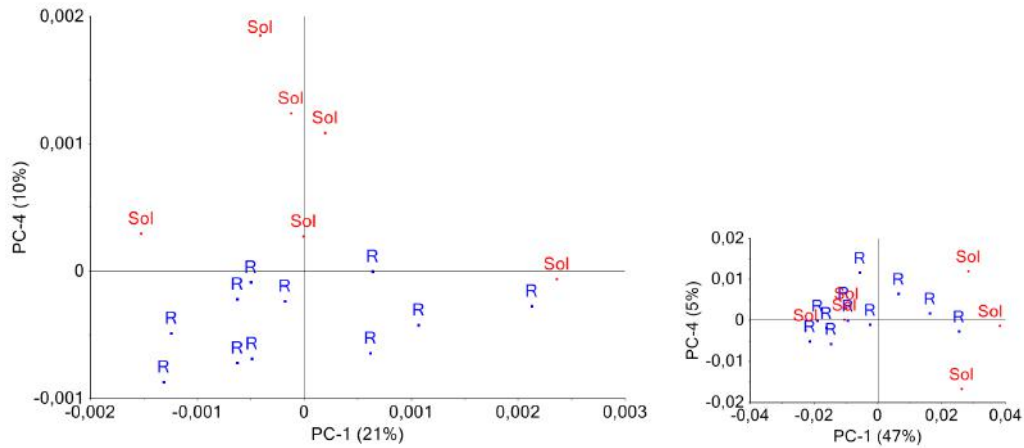


FIGURE 5.18 – Résultats de la corrélation croisée (XWT : cross wavelet transformation) des transformations à partir d'une ondelette de Gauss des mesures en cuve de référence et contenant la racine (6) avec une sinusoïde de fréquence 24, 54 et 108 kHz

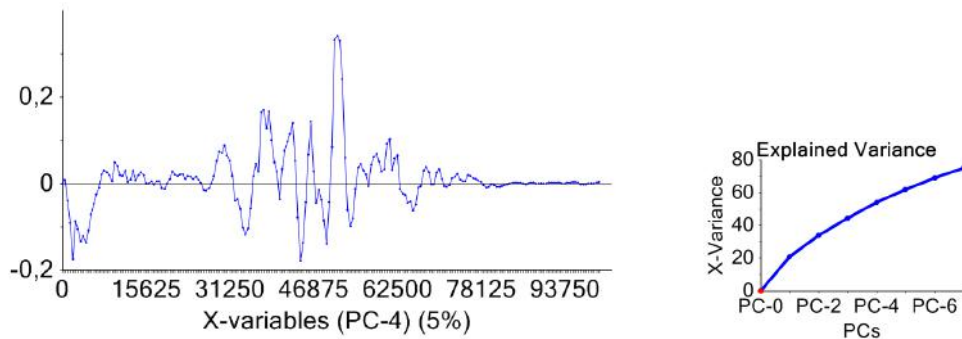
A nouveau, d'après la figure 5.18, la fréquence fondamentale est bien corrélée, de façon similaire (amplitude de la corrélation identique) sur l'ensemble des signaux enregistrés dans les différentes cuves de référence ou avec racine. La présence de la racine ne semble pas influencer l'amplitude des fréquences supérieures à 108 kHz et inférieures à 24 kHz.

Analyse en Composantes Principales (ACP)

A titre exploratoire, nous avons appliqué la méthode d'analyse en composantes principales, afin d'essayer de discriminer les signaux issus de la propagation dans le sol, de ceux issus de la propagation dans la racine. Les fréquences contenues dans la bande passante des transducteurs du Boviari (soit approximativement entre 10^4 et 10^5 Hz) représentent les variables de l'ACP. Le type de cuve, avec ou sans racine, sont les deux observations.



(a) ACP des observations de la voie 4 ; $D_{SR} = 20$ cm (b) ACP des observations de la voie 1 ; $D_{SR} = 5$ cm



(c) Corrélation entre les variables (les fréquences en Hz) et la composante principale 4 (d) Pourcentage de variance expliquée

FIGURE 5.19 – Etude par ACP des différences entre les cuves témoin et contenant l'échantillon racinaire - Nuage de points des observations (R : cuve avec racine, Sol : uniquement le sol) dans le plan des composantes principales 1 et 4. Pourcentage de variance expliquée = 31%

Le résultat de l'analyse en composantes principales présentée sur la figure 5.19 montre qu'il est possible de séparer les deux observations lorsqu'on projette sur les composantes principales 1 et 4, avec une variance totale expliquée de 31%. La figure 5.19d donne le pourcentage de corrélation des variables (les fréquences du spectre) par rapport à la composante principale 4. On distingue des corrélations positives et négatives. Seule une fréquence est au delà de 25% de corrélation, à environ 50 Hz. A basses fréquences (≥ 15 kHz) l'information semble être majoritairement portée par les racines comme remarqué à partir de l'analyse en ondelettes.

Synthèse des mesures en tomographie

Le tableau 5.2 permet de synthétiser l'ensemble des résultats des mesures de tomographie menées en laboratoire. L'effet de la racine est évalué sur chacune des quantités physiques en calculant le rapport entre la mesure dans la cuve contenant l'échantillon de racine et la cuve de référence. Les quantités physiques sont déterminées à la position $(X_{CDP}, Y_{CDP}) = (0.25, 0.25)$, au centre de la cuve, pour $D_{SR} = 5$ et 20 cm.

Orientation de l'échantillon	D_{SR}	Vitesse (m/s)	Amplitude (Volts)
Longitudinal	$D_{SR} = 5$	1.2	1.2
	$D_{SR} = 20$	7.3	0.8
Transverse	$D_{SR} = 5$	0.7	1.5
	$D_{SR} = 20$	5.2	1.1

Tableau 5.5 – *Rapports des quantités physiques (Vitesse, Amplitude) entre les mesures avec et les mesures sans racines enterrées.*

D'après les essais de transmission, l'information fournie par le terme de vitesse, pour des racines saines, semble pertinente afin de discriminer les racines dans un sol limoneux-argileux. La même conclusion a pu être formulée à partir de l'étude en cuve où la présence de racine augmente significativement la vitesse de propagation du milieu. Les vitesses transverse et longitudinale sont respectivement 5 et 7 fois supérieures lorsque la distance $D_{SR} = 20$ cm. En revanche, il n'y a pas de fortes variations de l'amplitude A_{RMS} quelle que soit la direction d'acquisition et la D_{SR} .

Des analyses supplémentaires sont nécessaires afin de réduire l'incertitude sur l'interprétation réalisée uniquement à partir du terme de vitesse. A ce stade, l'étude des propriétés spectrales ne semble pas être suffisamment au point pour combler cette incertitude. L'amplitude de la fréquence fondamentale reste inchangée en présence de racines. D'autres méthodes plus complètes permettent de s'intéresser à l'ensemble du spectre et donc à l'ensemble des apparitions et disparitions de modes. L'étude de la corrélation croisée d'ondelettes montre des différences d'amplitude situées a priori autour de 20 kHz de la corrélation sans pour autant apporter de façon précise les fréquences discriminantes entre les cuves avec ou sans racine. L'analyse en composantes principales amène quelques points de distinction sur les fréquences discriminantes lorsque le nuage de points est porté par un axe principal expliquant 21% de la variabilité. Des différences permettant la discrimination sont observées en particulier à environ 50 Hz. A basses fréquences (≥ 15 kHz), de façon identique à l'analyse en ondelettes, l'information semble être majoritairement portée par les racines.

5.3 Tomographie acoustique de type sol/tronc

5.3.a Introduction

Les essais de tomographie sol/tronc sont conduits sur le dispositif expérimental en conditions contrôlées. Le sol est considéré comme homogène, de même nature (argilo-limoneux), de même compaction et de teneur en eau identique sur l'ensemble de la placette sur laquelle est implanté l'arbre. Ceci permet de faire l'hypothèse que seule la présence de la racine produit une anomalie du signal acoustique. De plus, l'interprétation de nos résultats est rendue robuste grâce à la localisation précise des racines, les données étant analysées après le creusement du sol (figure 5.32).

Les objectifs de cette étude sont doubles : (i) dans un premier temps, il s'agit d'évaluer la faisabilité de la méthodologie tomographie sol/tronc sur notre capacité à répondre à la problématique de détection en validant parallèlement la pertinence de la géométrie d'acquisition et le choix du matériel utilisé (transducteurs source et réception) d'après la qualité des données acquises. (ii) dans un second temps, il s'agira de vérifier les hypothèses formulées à partir des résultats de laboratoire, cette fois-ci en conditions semi-contrôlées et de proposer une méthode d'interprétation des résultats en identifiant quelles sont les quantités physiques les plus pertinentes (vitesse, amplitude, spectre) pour la détection.

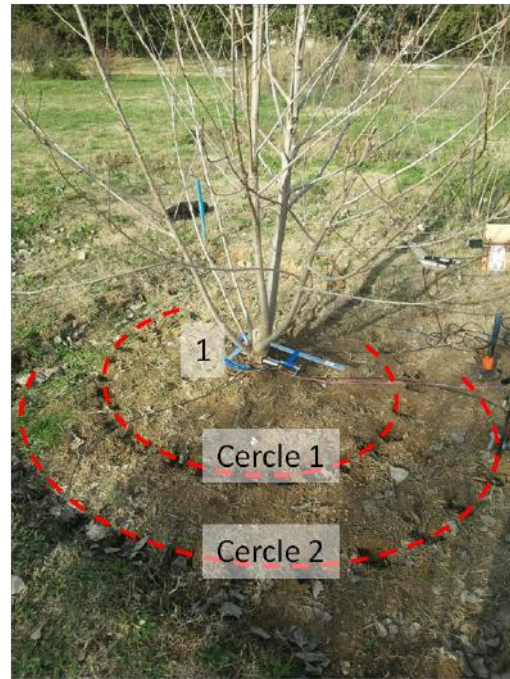
Enfin la conclusion permettra d'énoncer les limites et de proposer des solutions pour y faire face.

i Préparation de la placette expérimentale

Nous avons travaillé sur la placette n°2, de dimension carrée (3x3 m) sur laquelle est disposé un peuplier (*Populus Alba*) en son centre. La hauteur approximative de l'arbre est de 3,5 m et son diamètre au collet de 10 cm.

FIGURE 5.20 – Photographie de l'arbre d'étude

- **Arbre d'étude**
 - Placette n°2
 - Dimension = 3,5 m de hauteur
 - Diamètre du collet = 10 cm
 - Espèce = Peuplier
- **Matériel**
 - transducteurs en réception disposés suivant les quatre directions (correspondant aux quatre points cardinaux) distants de 90°
 - Fréquence centrale = 24 kHz (Sofranel)
- **Sources**
 - Marteau
 - Pénétrromètre (PANDA)



(a) Fixation des transducteurs à l'aide de serre-joint

Quatre transducteurs de réception sont disposés et mis en pression deux à deux à l'aide de deux serres joint sur le tronc (figure 5.21a) à une hauteur de 15 cm (par rapport au niveau du sol), distant chacun approximativement de 90° d'angle. Afin d'assurer un bon couplage, le tronc est préalablement limé, afin de rendre la surface de contact transducteur/tronc plane et un gel couplant est appliqué entre le tronc et le transducteur, ce qui permet une adaptation d'impédance. Les transducteurs utilisés sont de la marque Sofranel, directionnels et de fréquence centrale 24 kHz.

ii Caractérisation des sources

L'onde est enregistrée sur les transducteurs de réception situés à la base du tronc. Afin de caractériser les effets du milieu traversé, il est nécessaire de connaître les caractéristiques du signal source. Lors de cette étude, deux sources sont testées (figure 5.22) : le pénétrromètre de type PANDA conçu et développé par la société SolSolution® et le marteau.

Le pénétrromètre a pour utilité première le contrôle de compactage et la reconnaissance des sols. Lorsque l'on frappe avec un marteau sur la tête de tige, la tige s'enfonce progressivement dans le sol avec plus ou moins de difficulté ce qui permet de définir la résistance de pointe (corrélée au niveau de compactage). Les dernières versions développées proposent un procédé de

mesure permettant d'enregistrer et de découpler les ondes créées par l'impact du marteau et de calculer la contrainte et la déformation subies en pointe. Notre utilisation au cours de cet essai s'est limitée à la simple génération d'une onde à travers le sol et malheureusement notre version ne disposait pas de transducteurs permettant d'enregistrer l'information sur l'onde transmise. La source contrôlée par l'opérateur est dite d'énergie variable. Des méthodes de modélisation permettent de déterminer le type d'ondes transmises en considérant le fait que le pénétromètre est une tige vibrante et en considérant des conditions aux limites fixes (du côté de l'impact) et mobiles (dans le sol). Ce travail n'a cependant pas été réalisé dans le cadre de cet essai, le but étant d'obtenir un résultat qualitatif sur le choix de la meilleure source. Le second type de source, la source marteau est aussi d'énergie variable. L'onde est générée en frappant sur une plaque métallique posée directement en contact avec le sol.

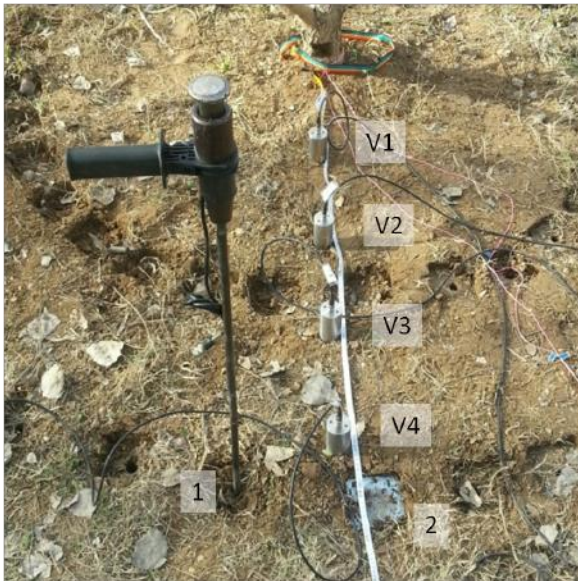


FIGURE 5.22 – *Dispositif utilisé pour l'estimation des caractéristiques des sources ; (1) Pénétromètre (2) Plaque de couplage pour la source marteau ; V_i : voie numéro i de mesure (la voie 4 est utilisée pour caractériser la source)*

Comparaison de la source pénétromètre et marteau

Les caractéristiques des sources sont estimées à partir de l'enregistrement sur le transducteur de la voie 4 (figure 5.22) qui est située à proximité de l'impulsion. La figure 5.23 présente les résultats sans traitement des propriétés temporelles et spectrales. Pour chaque source, la mesure est répétée 30 fois afin d'améliorer le rapport signal sur bruit. L'échantillonnage de 500 kHz respecte le théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon et nous permet d'interpréter les spectres présentés ici jusqu'à 10×10^5 Hz.

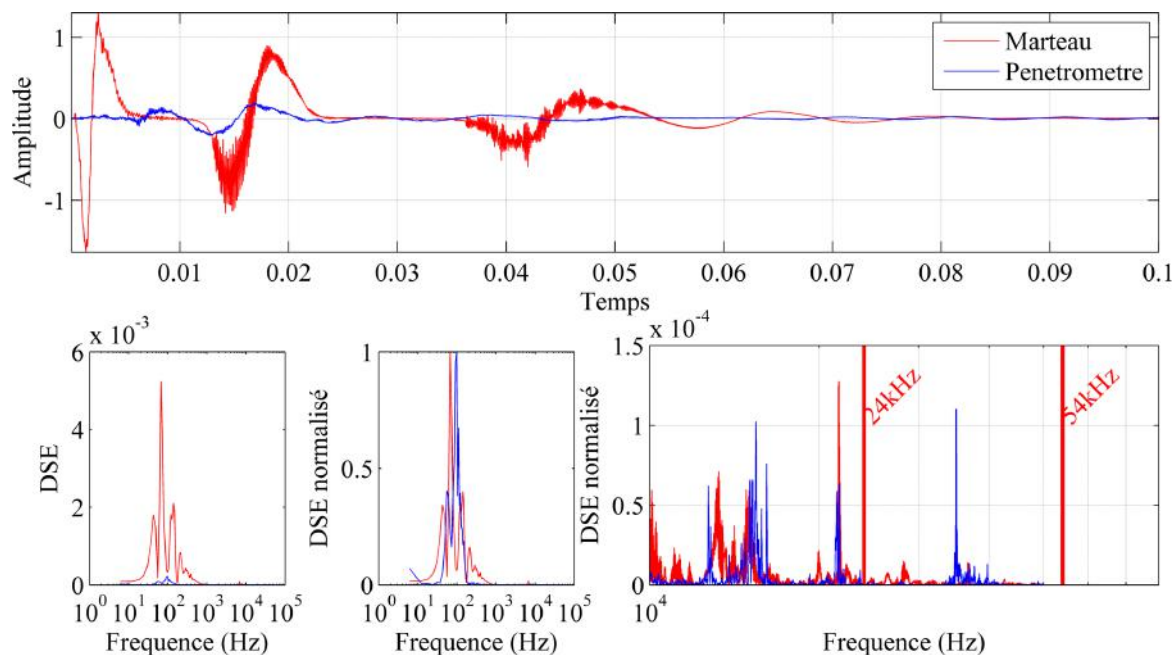


FIGURE 5.23 – *En haut : représentation de la forme du signal dans le domaine temporel selon la source ; en bas de gauche vers la droite : Densité spectrale d'énergie (DSE), DSE normalisée puis DSE normalisée dans la gamme de fréquence théorique du transducteur*

A partir du signal temporel nous constatons que la source marteau est bien plus énergétique que la source issue du pénétromètre. Pour la source marteau, nous observons quelques échos probablement liés aux rebonds de la plaque d'aluminium servant de couplant avec le sol. Quelle que soient la source, nous observons logiquement une forme d'onde de type impulsionnelle. Cependant l'impulsion de la source marteau semble être plus courte en temps (de 0,05 à 0,07 ms) par rapport à la source pénétromètre qui s'apparente plus à une sinusoïde étendue (Sweep). Ceci se traduit bien dans le domaine fréquentiel où nous observons que la gamme de fréquences générées par la source marteau (approximativement de 5 à 9×10^4 Hz) est plus étendue que pour le pénétromètre (approximativement de 5 à 9×10^3 Hz). Lorsque nous considérons la gamme théorique du transducteur (plus ou moins la moitié de sa fréquence centrale) soit entre 10^3 et 10^4 Hz, l'amplitude des fréquences est moins élevée d'un facteur 10 par rapport au maximum situé à approximativement 10^2 Hz. La gamme de fréquences générées par les deux sources couvre tout de même bien la bande passante des transducteurs.

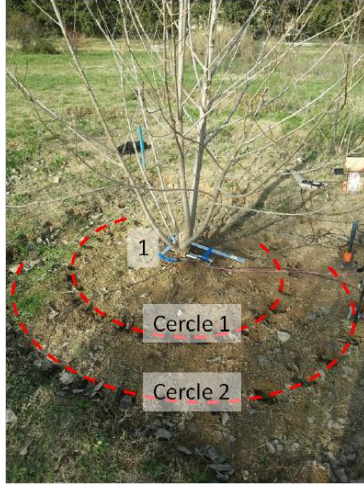
5.3.b Méthodologie expérimentale

i Géométrie d'acquisition de la tomographie sol/tronc

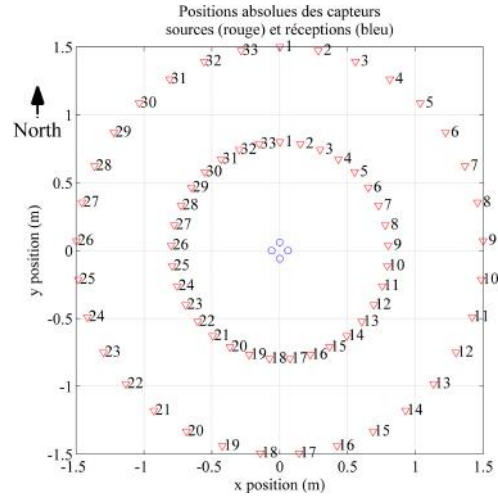
La figure 5.24 ci-dessous illustre la géométrie d'acquisition et les positions de la source mobile autour du tronc. Deux cercles de rayon 80 et 120 cm sont réalisés consécutivement. Sur chacun des cercles, 33 mesures, correspondant aux positions de la source, sont réalisées pour achever un cercle complet de 360° autour de l'arbre. Chaque mesure est donc distante de 11° d'angle, ce qui correspond à la résolution angulaire. Les résultats sont orientés en fonction de l'azimut par rapport au Nord magnétique, la première mesure correspond à 0° Nord.

ii Paramètres d'acquisition

Les signaux sont enregistrés sur une durée de 10 ms, avec une fréquence d'échantillonnage de 100 kHz. Pour chaque position source, la mesure est répétée dix fois pour être moyennée afin de réduire la rapport signal sur bruit.



(a) (1) Position des transducteurs de réception sur le tronc; cercles 1 et 2 : cercles définis par la source mobile (respectivement de rayon 80 et 120 cm)



(b) Orientation (par rapport au Nord magnétique) et discrétisation des mesures suivant les deux cercles d'acquisition

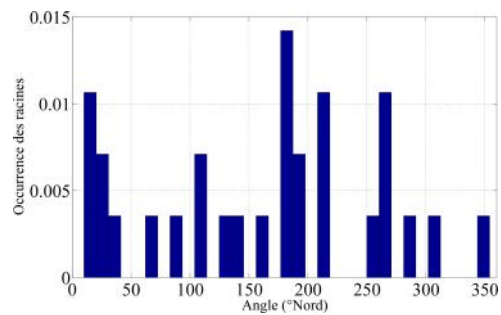
FIGURE 5.24 – Géométrie d'acquisition de la tomographie sol/tronc

iii Détermination des positions réelles des racines après excavation

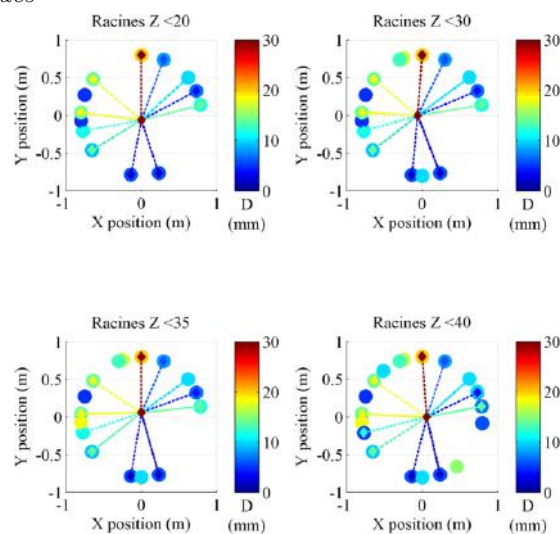
La position de chaque racine principale (orientation et profondeur) a été notée avant l'étape de plantation ce qui a permis d'orienter le choix de cette placette. En effet, un an après la plantation, nous avons sélectionné un arbre de 320 cm de haut, avec un système racinaire composé de grosses racines superficielles. La photographie 5.25a montre le travail de dégagement progressif du sol. Pour les profondeurs 20, 30, 35 et 40 cm, le diamètre et l'orientation des racines présentes sont notés. Le diamètre est mesuré à 80 cm du tronc à l'aide d'un pied à coulisse. On suppose que le diamètre au départ du tronc est plus important puisque avec son élongation, la racine décroît en diamètre. L'orientation est déterminée à l'aide d'une boussole et correspond à l'azimut par rapport au nord magnétique. Il existe donc un biais sur chacune des mesures de position (profondeur et azimut) ainsi que sur le diamètre dont il faudra tenir compte lors de l'interprétation des résultats.



(a) Photographie de la tranchée effectuée à approximativement 100 cm de distance du tronc et mise en évidence de racines tracantes peu profondes



(b) Histogramme normalisé de l'occurrence des racines (toutes racines confondues) en fonction de l'azimut (°N)



(c) Mise en évidence de la position réelle des racines à la plantation en vue d'une comparaison avec les données physiques

FIGURE 5.25 – Mise en évidence de la position réelle des racines après excavation en vue d'une comparaison avec les données physiques

Nous constatons d'après la figure 5.32b, que ce peuplier a construit de nombreuses racines superficielles (29 relevées) dans toutes les directions. La moyenne des diamètres est de 12 mm, le maximum de 75 mm (à 100° N, non représentée pour ne pas saturer l'échelle), le minimum considéré de 5 mm. Nous distinguons quelques zones de concentrations racinaires à partir de l'histogramme présenté sur la figure 5.32a, notamment entre les angles 100 et 200° Nord. A noter aussi la présence d'une zone sans racine située entre 310 et 340°.

5.3.c Validation de la méthodologie de tomographie sol/tronc

Cette partie est un travail en amont à la détection, réalisé afin d'évaluer la faisabilité de la méthodologie tomographie sol/tronc. Ceci permettra de vérifier à la fois la pertinence du matériel utilisé, mais aussi de valider la démarche d'acquisition avec le positionnement des transducteurs sur le tronc.

De plus, à la suite de l'acquisition, le nombre de signaux enregistrés est important (264) et représente une richesse potentielle dont il faut savoir extraire l'information. En effet par la

suite, nous menons l'interprétation des données en fonction de deux cercles d'acquisition de rayon 80 et 120 cm, ainsi que de quatre quantités physiques (identiques à ceux utilisés lors de l'étude d'échantillons en laboratoire) : la vitesse de propagation (V), l'amplitude RMS (A_{RMS}), la fréquence fondamentale (f_{max}) et son amplitude ($A_{f_{max}}$). Les paragraphes suivants (i,ii,iii et iv) permettent de vérifier la cohérence des données et de comprendre comment les interpréter. L'analyse des ressemblances des différentes quantités physiques permettra ainsi d'analyser leurs corrélations et de déterminer s'ils sont redondants ou non.

Les résultats sont pour la plupart étudiés par visualisation directe du graphique ou bien exprimés à l'aide du coefficient de corrélation r calculé à partir de la définition donnée par Pearson qui permet d'analyser les relations linéaires entre deux variables aléatoires. La ressemblance entre deux courbes statistiques peut également relever de la pure coïncidence. A l'inverse, un coefficient de corrélation faible n'exclut pas que deux variables exercent une influence l'une sur l'autre. Pour évaluer si le coefficient est significatif, la probabilité "p-value" (selon Pearson) est calculée et ajoutée au calcul de r .

i Comparaison du signal angulaire selon les voies

La comparaison des variations des quantités physiques selon la voie de mesure a pour objectif de déterminer si chaque transducteur enregistre la même chose ou non et dans le cas contraire de montrer que l'orientation des transducteurs par rapport à la position de la source a un effet sur le signal enregistré.

A partir de la figure 5.32, nous constatons que quelle que soit la source et quelle que soit la distance au tronc, l'angle entre la source et les transducteurs de réception ne semble pas influencer significativement l'amplitude de l'onde reçue. Par exemple, lorsque la source se situe en face de la voie 1 (270°), l'amplitude de la voie 1 est plus petite que celle de la voie 4. Les différences d'amplitude observées entre les voies existent mais sont plutôt la conséquence d'un plus ou moins bon couplage entre le transducteur et le tronc.

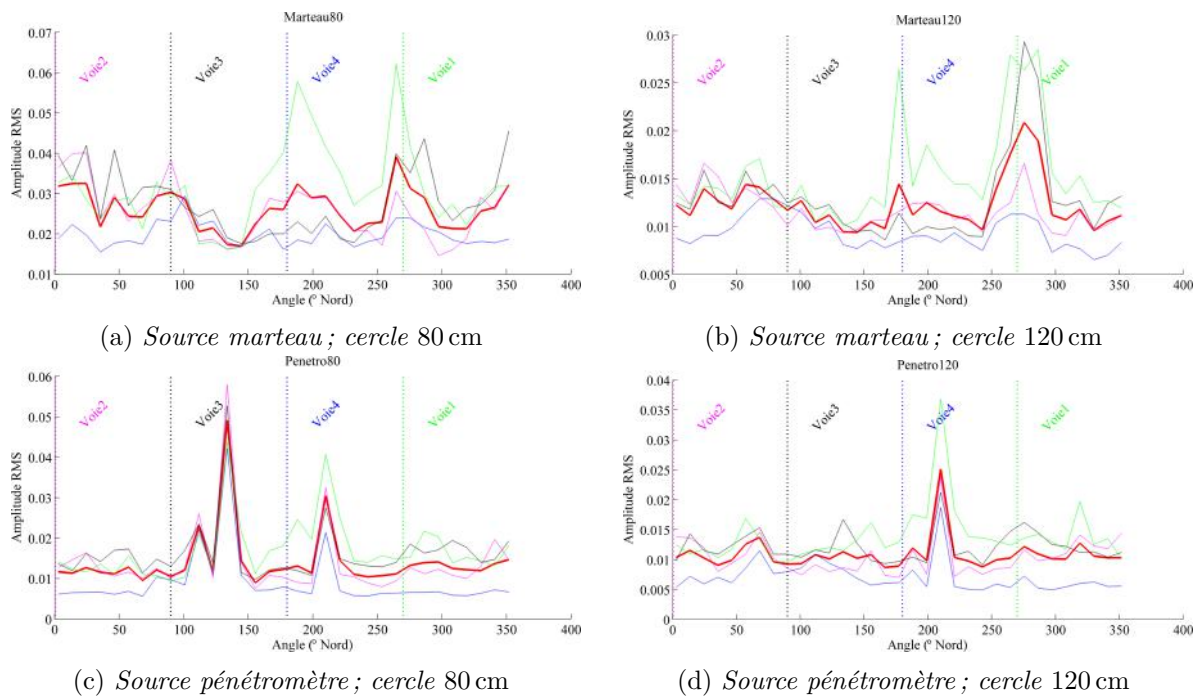


FIGURE 5.26 – Comparaison des variations angulaires de l'amplitude RMS selon les quatre voies de mesure placées sur le tronc - Le trait plain rouge représente la moyenne des quatre voies

Le même constat peut être fait sur la vitesse (Fig. 5.27). Les quatre transducteurs de réception situés sur le tronc selon les quatre axes cardinaux enregistrent des tendances pratiquement identiques (variation de ± 60 m/s). Notons que l'arbre d'étude possède un tronc de diamètre relativement petit. Il est donc possible que ces résultats ne soient plus valables lorsque les transducteurs sont fixés sur des troncs de diamètres plus usuels de l'ordre de 50 cm.

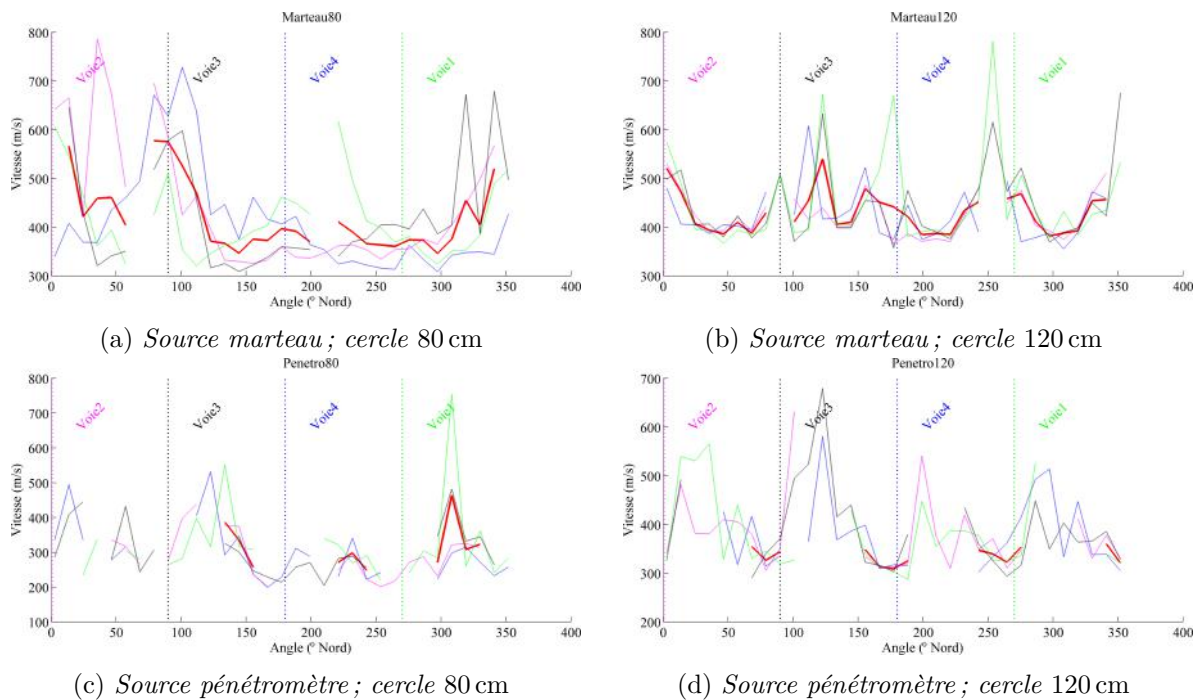


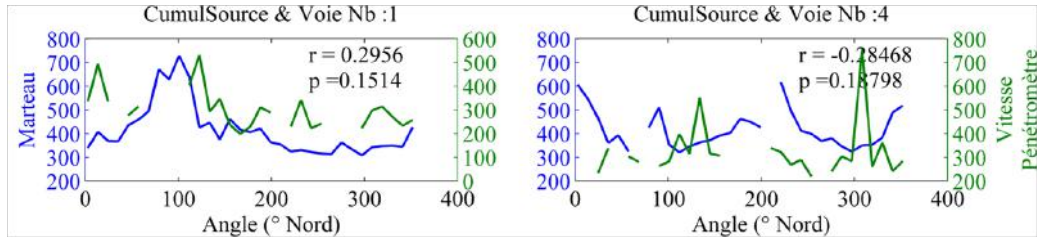
FIGURE 5.27 – Comparaison des variations angulaires de la vitesse selon les quatre voies de mesure placées sur le tronc - Le trait plain rouge représente la moyenne des quatre voies

La comparaison du signal angulaire selon les voies a permis de montrer que les voies pouvaient être interprétées conjointement, ceci assurant une redondance intéressante de l'information. Cependant, certains transducteurs semblent être moins bien couplés au tronc que d'autres. Nous privilégions donc par la suite l'utilisation de la voie 4, qui donne les signaux avec le meilleur rapport signal sur bruit pour l'interprétation sur la détection.

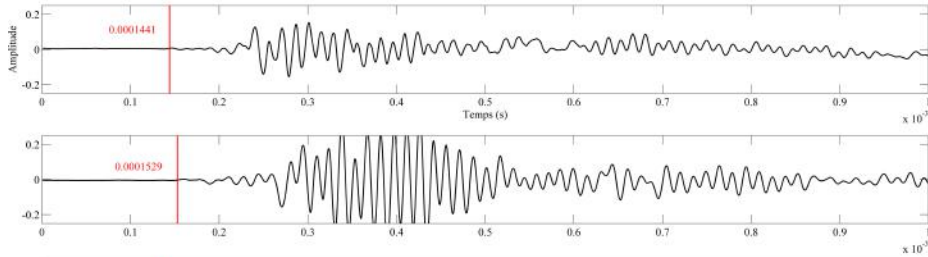
ii Comparaison des profils angulaires selon la source

La comparaison des variations des quantités physiques selon la source a pour but de déterminer qu'elle est la source la plus adaptée à l'excitation des racines.

D'après la figure 5.28a, la série de données des variations angulaires de la vitesse présente des discontinuités. Ceci traduit le fait qu'il est impossible d'effectuer manuellement un pointé de la première perturbation lorsque le niveau de bruit du signal est trop élevé. Or, nous constatons que les signaux issus de la source pénétromètre sont bien plus bruités et que les vitesses sont complexes à déterminer. Ceci est d'autant plus vrai lorsque le transducteur n'est pas suffisamment bien couplé avec l'arbre. C'est le cas de la voie 4 pour laquelle tous les signaux ne peuvent pas être pointés, même avec la source marteau. Sur la voie 1, les variations lentes de la vitesse, de 300 m/s de part et d'autre de l'augmentation formée par le pic situé entre 80° et 110° N (centré sur 100°N), semblent être identiques quelle que soit la source (aux erreurs de position près).



(a) Profil angulaire de la vitesse ; cercle 80 cm ; comparaison de la qualité entre la voie 1 et 4 (mal couplée)



(b) Exemple de pointé manuel d'une onde enregistrée lors de la tomographie de l'arbre ; transducteur 24 kHz fixe sur le tronc, source : marteau

FIGURE 5.28 – Comparaison des profils angulaires selon la source

La figure 5.28b montre l'enregistrement de deux voies de mesure (210°, cercle 120 cm). La position de la première perturbation, que l'on choisit par convention négative, est matérialisée par le trait vertical rouge. Afin de tenir compte des erreurs d'appréciation, nous considérons une incertitude de 10 ms sur le temps d'arrivée. Quant à l'erreur sur le placement de la source, elle est fixée à 10 cm.

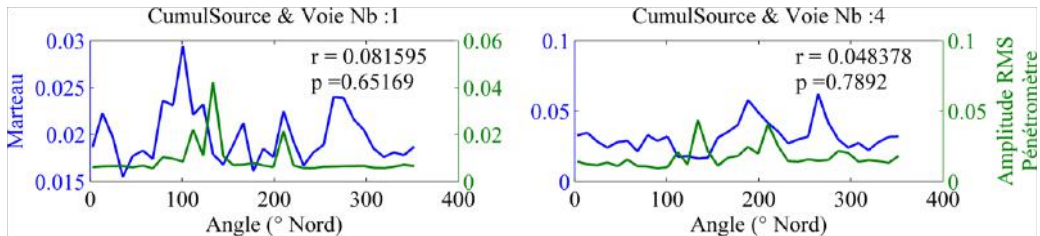


FIGURE 5.29 – Profil angulaire de l'amplitude RMS ; cercle 80 cm

Les variations de l'amplitude angulaire enregistrées suivant la source ne sont pas identiques. Une des explications peut provenir du fait que lorsque nous frappons sur le pénétromètre, la tige s'enfonce. La profondeur du signal source est donc variable et dans ce cas le fait de répéter la mesure ne permet pas de réduire le rapport signal sur bruit. Par ailleurs, les contraintes aux limites exercées changent ce qui génère un autre mode de vibration. La forme de l'onde incidente du pénétromètre est modifiée en amplitude et dans son contenu fréquentiel, les variations angulaires de l'amplitude ne sont donc pas similaires à celles obtenues avec la source de type marteau.

iii Comparaison du signal angulaire selon les deux rayons d'acquisition (80 et 120 cm)

La comparaison des variations d'une quantité physique selon deux diamètres d'acquisition peut être un critère de cohérence du résultat de la détection. En faisant l'hypothèse que la

racine croît horizontalement et de façon rectiligne (dans une direction fixe), si un pulse est observé sur le cercle de rayon 120 cm, il semble logique de pouvoir l'observer également sur le cercle de rayon inférieur. En revanche, le contraire n'est pas nécessairement vrai, la racine pouvant avoir une longueur intermédiaire.

L'étude de la corrélation entre cercles semble mettre en évidence les erreurs de placement de la source. Sur certaines voies, nous observons de petits décalages (de l'ordre de 8° d'angle). Les probabilités de corrélation restent pratiquement inchangées lorsque l'on ajuste les deux cercles. Nous conduisons donc notre interprétation sur les données brutes.

D'après l'échelle des axes des ordonnées de la figure 5.30a, l'amplitude RMS est divisée environ par deux lorsque la distance au tronc augmente de 50%. Cependant le niveau de bruit de la mesure ne semble pas être atteint, les tendances étant identiques suivant les deux cercles. Les signaux sont significativement corrélés entre eux sur toutes les voies de mesure ($p \geq 0.05$) pour le terme d'amplitude de l'onde (figure 5.30a).

Pour la représentation des variations angulaires de vitesse (figure 5.30b), les échelles sont fixées entre 200 et 800 m/s pour les deux cercles. En moyenne, la vitesse de propagation est de 450 m/s, valeur équivalente à celle observée en laboratoire. La seule anomalie significative en considérant un intervalle de confiance de ± 100 m/s est observée sur la voie 1, avec une augmentation brusque de la vitesse à 100° N (+200 m/s), visible sur les deux cercles. Sur les autres voies, il n'existe aucune corrélation. Dans ce cas, soit les variations angulaires de la vitesse ne sont pas significatives (± 100 m/s), soit elles ne sont visibles que sur le cercle d'acquisition de rayon 120 cm, ce qui s'apparente a priori à des erreurs d'estimation des temps d'arrivées.

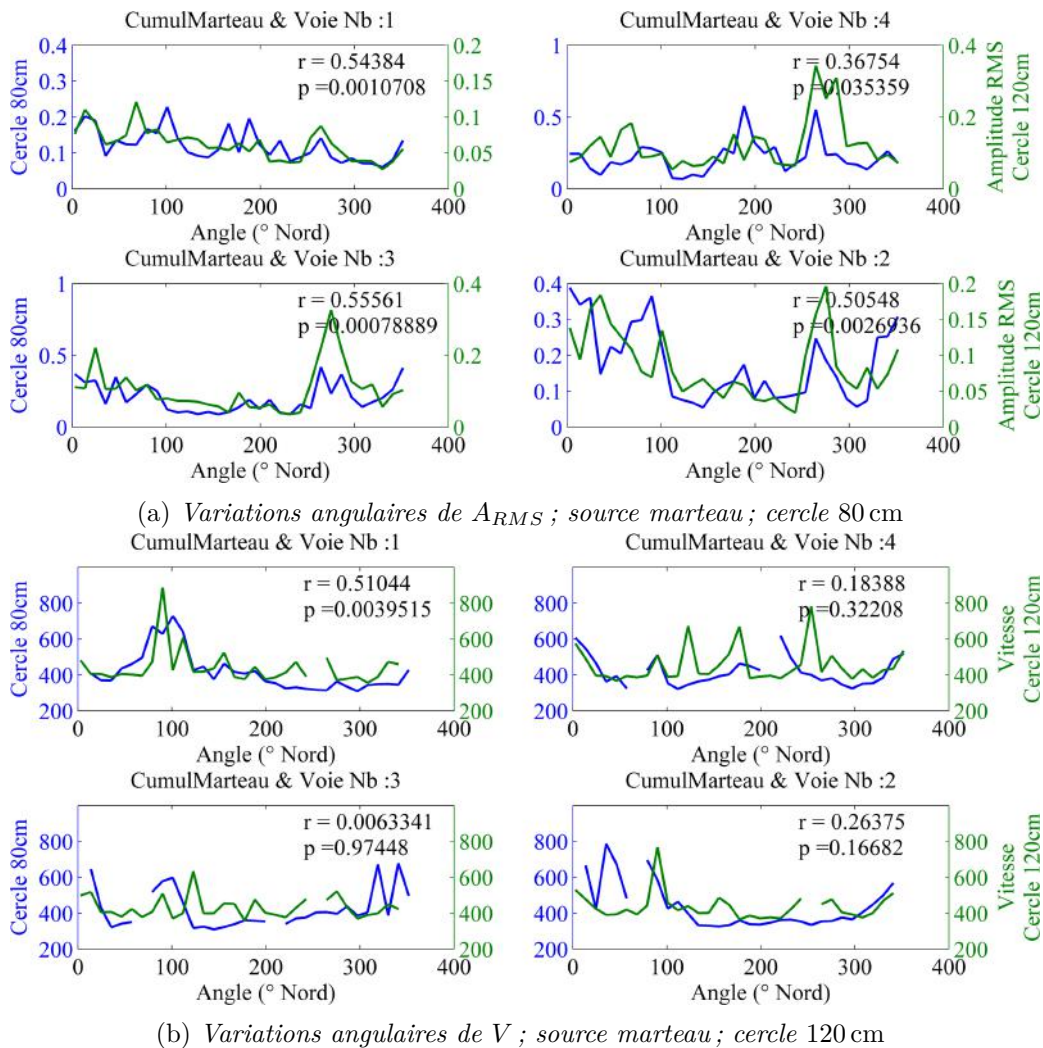


FIGURE 5.30 – Comparaison des variations angulaires de l’amplitude (5.30a) et de la vitesse (5.30b) selon les quatre voies de mesure placées sur le tronc pour les deux cercles, 80 cm et 120 cm

Lorsque la série de données est très dispersée (bruitée), il n’existe aucune corrélation. En revanche, lorsque l’on observe des variations significatives alors les voies sont la plupart du temps corrélées. En ce point, la corrélation entre les cercles semble être un bon indicateur sur l’assimilation d’un pic à la détection d’une racine et non à une valeur aberrante.

iv Comparaison des profils angulaires selon différentes quantités physiques

La comparaison des variations selon différentes quantités physiques a pour objet de déterminer laquelle est la plus pertinente à interpréter. Il s’agira de montrer si les quantités physiques devront être interprétées conjointement (ou au contraire indépendamment) en fonction de leur sensibilité différente sur la présence de racine et sur les variations de composition de sol (compaction, teneur en eau..). Cette analyse sera faite à partir d’une analyse de corrélation.

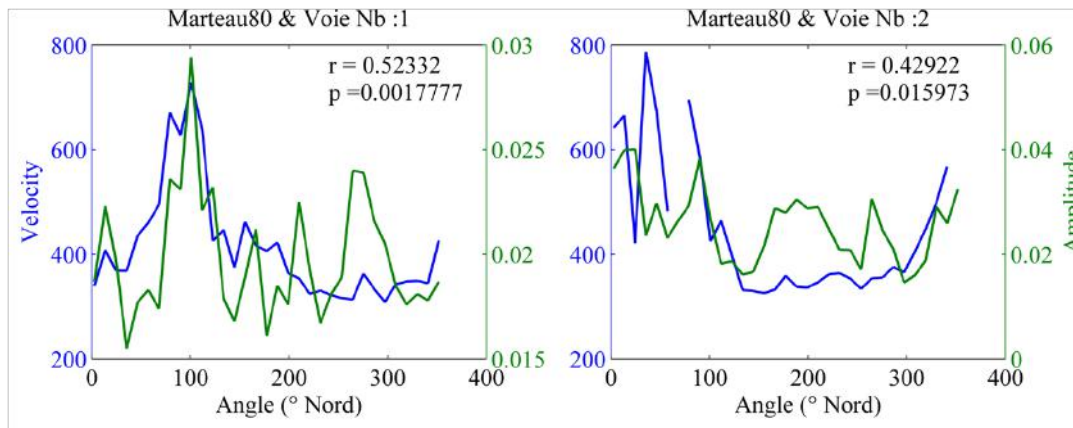


FIGURE 5.31 – *Comparaison des profils angulaires selon différentes quantités physiques*

La corrélation entre vitesse et amplitude n'est significative que sur les voies 1 et 2 pour le marteau ($p < 10^{-2}$) et pour le cercle de diamètre de 80 cm (figure 5.31). Le maximum de la vitesse et de l'amplitude sur la voie 1 coïncident à l'abscisse 105°N . La forme et la largeur du pic formé, composé de quatre points de mesure, est semblable pour chacune de ces deux quantités. La tendance lente des variations semble aussi être identique bien que la série de donnée de l'amplitude soit plus dispersée.

v Synthèse de la tomographie acoustique de type sol/tronc

Afin de faciliter le traitement des nombreuses données acquises, nous étudierons, dans le cas d'un arbre dont le tronc est inférieur à la longueur d'onde dominante du signal, une seule voie de mesure car toutes enregistrent sensiblement la même chose. Nous choisissons dans ce cas la voie 4 pour laquelle les variations d'amplitude sont les plus fortes et la série de données est la moins dispersée.

L'étude préliminaire a aussi permis de montrer que le choix de la source est un critère important sur la qualité des résultats. La gamme de fréquences excitées par les deux sources étudiées est sensiblement la même. Cependant la source par le marteau est plus énergétique et permet d'obtenir de meilleurs résultats. Même si la source n'est pas normalisée, l'impact à l'aide d'un marteau sur une plaque couplante est plutôt bien répétable (contrairement à la source pénétromètre) et permet d'augmenter le rapport signal sur bruit lorsque l'on moyenne les signaux. Ceci se manifeste clairement sur le nombre de pointés réalisés bien supérieurs pour la source marteau.

L'étude préliminaire a montré qu'il est important d'interpréter les variations de V et de A_{RMS} indépendamment. Bien que ces quantités semblent parfois être corrélées (en particulier lorsque des variations franches de la vitesse sont observées), la dispersion de la série de données de l'amplitude est élevée et peut induire des erreurs d'interprétation. Nous en déduisons, après comparaison avec la position réelle des racines, quelle quantité physique parmi la vitesse, l'amplitude ou les caractéristiques spectrales est la plus pertinente pour la détection.

5.3.d Comparaison des résultats avec la position réelle des racines

Les résultats sont représentés en superposant l'histogramme de l'occurrence des racines avec la courbe des variations angulaires d'une quantité physique. Cette représentation a l'avantage de mettre en évidence une correspondance spatiale entre le profil angulaire et la présence d'une racine, typiquement lors de variations brusques. Une régression n'aurait pas été satisfaisante pour modéliser des variations brusques, en particulier lorsque l'on sélectionne certaines racines et que par conséquent on ne dispose que de peu de points. Les histogrammes sont déterminés en

considérant autant d'intervalles que de mesure moins une. L'axe vertical de l'histogramme est fixé de façon à ce que l'aire totale sous l'histogramme soit égale à 1.

i Comparaison de la vitesse de propagation (V)

La figure 5.32a présente l'histogramme de la distribution angulaire de toutes les racines confondues (Quelles que soient leurs tailles, quelles que soient leurs profondeurs). Les quatre voies d'acquisition sont représentées et le profil de vitesse obtenu avec la source marteau est superposé à l'histogramme des racines. Nous distinguons un unique pulse de vitesse correspondant à une augmentation de 300 m/s par rapport à la vitesse moyenne (400 m/s), formé de quatre points de mesure (soit de 40° d'angle), avec un maximum situé à 100° Nord. Ce pulse n'est pas expliqué par la distribution actuelle des racines considérées.

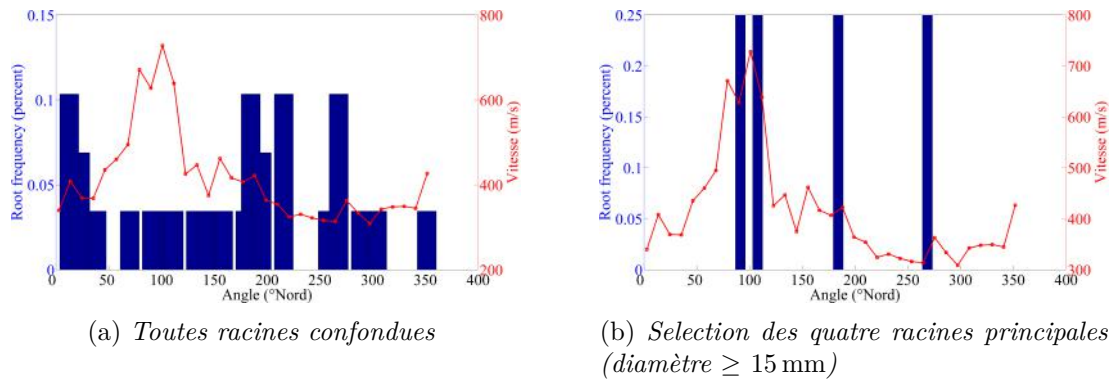
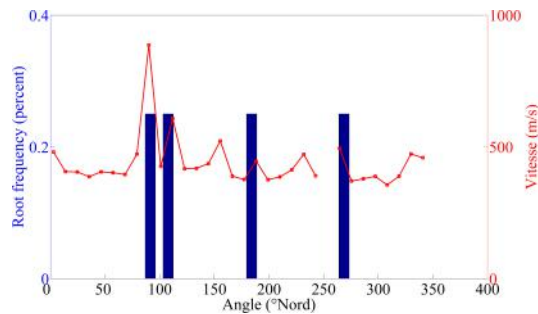


FIGURE 5.32 – Superposition de l'histogramme des occurrences de racines avec le profil angulaire de vitesse obtenu sur le cercle de diamètre 80 cm (en rouge)

Après sélection des racines principales, c'est-à-dire les racines pour lesquelles le diamètre est supérieur à 15 mm, d'après la figure 5.32b, les variations angulaires de la vitesse sont mieux expliquées par la position des racines. Seule la racine située à 100° N (10 cm de profondeur, 75 mm de diamètre), qui de plus est située à proximité d'une racine de 20 mm de diamètre à 108° N, semble créer un anomalie de vitesse significative (+300 m/s). Les deux autres racines situées à 180 et 260° N, respectivement de diamètre 19 et 20 mm ne créent pas d'anomalie de vitesse significative (± 50 m/s).

FIGURE 5.33 – Superposition de l'histogramme des trois racines principales (diamètre ≥ 15 mm) avec le profil angulaire de vitesse obtenu sur le cercle de diamètre 120 cm (en rouge)

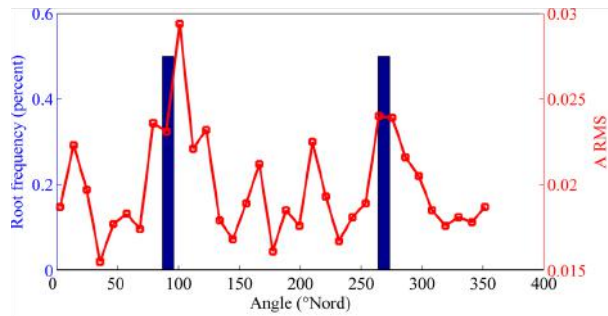


La tomographie effectuée sur le rayon 120 cm (figure 5.33, conforte le résultat constaté précédemment. En supposant que la racine continue à se développer dans la même direction, nous retrouvons une anomalie de vitesse située aux environs de l'angle 110° N. Dans ce cas, les pics sont distincts l'un de l'autre. Le pic de plus grande vitesse (800 m/s) semble correspondre à la racine de diamètre 75 mm, alors que le second pic de vitesse inférieure (600 m/s) pourrait quant à lui correspondre à la racine de 20 mm de diamètre à 108° N.

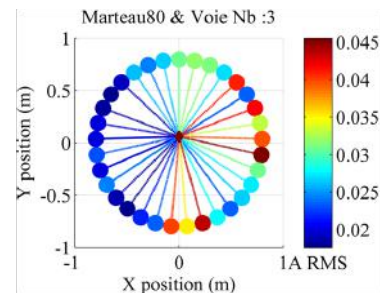
Le signal de la source pénétrömètre est bien plus bruité, ce qui rend les pointés parfois impossibles. La corrélation obtenue avec la présence de racines après sélection n'est pas satisfaisante.

ii Comparaison de l'amplitude RMS (A_{RMS})

La figure 5.34 présente les variations de A_{RMS} . Par comparaison avec la vitesse, la série de données est plus dispersée autour d'une valeur moyenne de 0,02 V. Le pic principal de l'amplitude est situé aux erreurs de position près, en correspondance avec la racine principale 100 °N, et avec une amplitude trois fois supérieure au signal moyen. De même, le second pic met en évidence une racine de diamètre inférieure à 270 °N. Il n'est cependant pas possible de conclure avec certitude sur la présence d'une racine étant donné la forte dispersion de la série de donnée autour de sa valeur moyenne.



(a) Représentation des variations de A_{RMS} après sélection des deux racines principales (diamètre ≥ 15 mm)



(b) Représentation des variations angulaires sous forme de rais rectilignes dans le système de coordonnées polaires)

FIGURE 5.34 – Superposition de l'histogramme des occurrences de racines avec le profil angulaire d'amplitude RMS obtenu sur le cercle de diamètre **80cm** (en rouge)

Cette information s'ajoute à celle obtenue à partir de la vitesse mais avec un degré d'incertitude très important. A nouveau, les signaux issus de la source pénétrömètre sont bien plus bruités. La corrélation obtenue avec la présence de racines après sélection n'est pas satisfaisante.

iii Comparaison des paramètres spectraux : f_{max} et $A_{f_{max}}$

Les figures 5.35a et 5.35b ci-dessous représentent respectivement la position du pic spectral et son amplitude obtenues après transformée de Fourier.

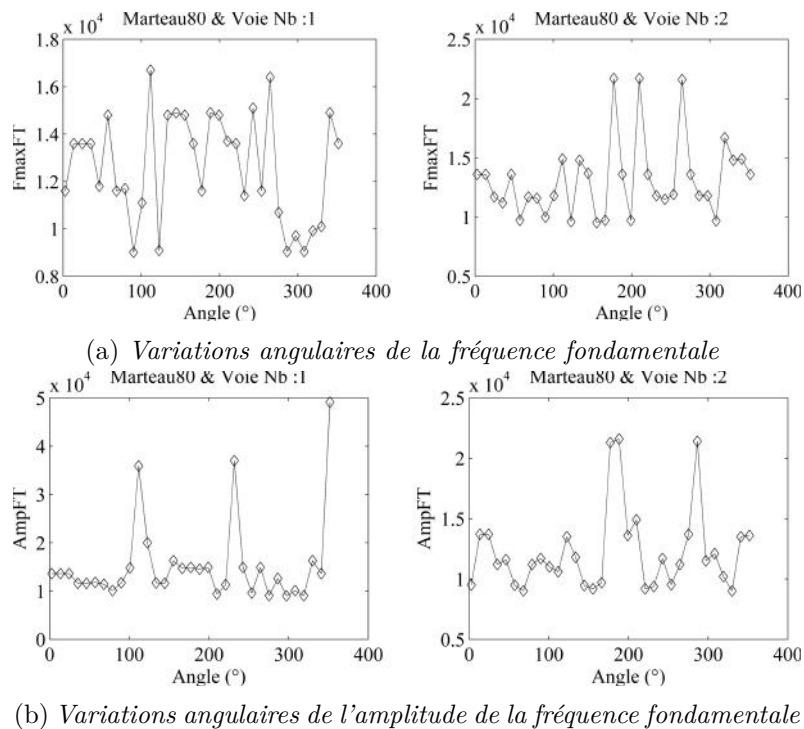


FIGURE 5.35 – Visualisation des variations angulaires des paramètres spectraux

A ce stade, la fréquence fondamentale ne semble pas être un bon indicateur de détection, aucune tendance en rapport avec la position réelle des racines étant observée. Soit cette méthodologie n'est pas celle à suivre, soit ces quantités sont mal déterminées car le spectre est modifié par le bruit de la mesure. Les deuxième et troisième fréquences de propagation ne permettent pas non plus de mettre en évidence des variations angulaires qui pourraient traduire la présence de racine (en particulier la racine principale observée à 100°N). La position des pics des fréquences inférieures (2ème et 3ème) est déterminée à l'aide d'un algorithme contenant des paramètres d'entrée pas forcément bien adaptés (largeur du pic à considérer, distance avec les autres pics principaux ...). De façon similaire à la fréquence fondamentale, aucune tendance en rapport avec la position réelle des racines n'est observée pour l'amplitude de la fréquence fondamentale.

Malgré de mauvais résultats obtenus avec cette méthode, il est possible que l'analyse du spectre puisse donner une information complémentaire pour aider à prendre une décision sur la détection de la racine. Cependant, il faut pour cela proposer une méthode plus évoluée que celle proposée dans certaines études telle que [Mugleton et al. \(2014\)](#) qui a pourtant prouvé son efficacité pour la détection de conduites à faible profondeur mais pour laquelle les conditions de détection semblent être plus propices. Deux poursuites d'études, initiées pour les essais de laboratoire sont possibles : l'étude de la corrélation des ondelettes et l'analyse en ACP qui a donné de bons résultats sur l'expérience de laboratoire. Ces deux approches permettraient de considérer l'ensemble des fréquences du spectre et éventuellement permettraient de trouver une fréquence plus discriminante que celles correspondant aux trois principales fréquences de propagation.

iv Synthèse

La mise en place du dispositif d'acquisition de tomographie de type sol/tronc a posé quelques problèmes techniques. Le bon couplage des transducteurs sur un arbre de petite dimension n'est

pas aisé et nécessite une préparation importante (limage de l'écorce, gel couplant). Malgré cela, les premiers résultats obtenus à partir de ce dispositif semblent être physiquement acceptables. Quelle que soit la source et la distance source-récepteur, en plaçant des transducteurs de fréquence centrale 24kHz sur le tronc, l'onde se propageant à travers le sol est bien reçue. Ainsi le choix de transducteurs centrés à une fréquence entre l'acoustique et l'ultrasonique, bien que pas nécessairement optimal semble être pertinent pour l'enregistrement d'onde à cette distance. La qualité de l'enregistrement diffère selon le type de source. Il semble que les deux sources soient adaptées pour générer de hautes fréquences ($\geq 10^4$ kHz), mais il est impossible d'augmenter le rapport signal sur bruit avec le pénétromètre car la position source varie avec l'enfoncement de la tige. Les valeurs de vitesses calculées, après la détermination de la première perturbation arrivée (approximativement de 450 m/s) sont cohérentes avec celles obtenues en laboratoire. Des corrélations sont observées entre les quantités physiques mesurées, entre les cercles d'acquisition et entre les différentes voies, ce qui justifie une certaine qualité des résultats.

La géométrie d'acquisition avec une source mobile autour du tronc et une réception fixe semble être pertinente pour mettre en évidence des anomalies racinaires en considérant en première approximation qu'une racine croît de façon rectiligne dans une direction donnée à partir du tronc. Ce type de géométrie d'acquisition implique une erreur sur la position de la source de quelques degrés d'angle. Un maillage de 10° est le minimum à considérer en vue de distinguer deux anomalies consécutives. De plus, si le maillage est fin, alors l'anomalie peut être vue sur plusieurs points de mesure formant un pic et la détection est d'autant plus acceptable.

En termes de détection, chaque quantité physique mesurée et calculée doit être prise en compte pour l'analyse finale. Par exemple, l'amplitude mesurée peut être sensible à des variations de compaction ou de teneur en eau qui peuvent traduire des conditions plus ou moins favorables au développement racinaire et mener indirectement à la détection. Cependant, il semble que la vitesse soit la quantité la plus stable sur laquelle nous avons le plus de maîtrise. La vitesse n'est déterminée que lorsque le signal est de bonne qualité. L'unique source d'erreur est donc l'incertitude sur la distance et sur le pointé. Si l'on prend en compte cette incertitude dans l'interprétation, alors nous pouvons accorder une bonne crédibilité à la vitesse sur le résultat de la détection.

Après excavation des premiers décimètres du sol, nous avons pu relever les positions réelles des racines. Par comparaison avec les données acoustiques, la qualité de la corrélation augmente lorsque l'on considère uniquement les racines de diamètres ≥ 15 mm, ce qui est pertinent en terme de résolution de détection possible. La position de plusieurs racines situées proches de la surface et proches l'une de l'autre à 100° et 10° N coïncident avec une anomalie de vitesse d'environ +300 m/s. Cette anomalie est formée par quatre points de mesure (soit 30° d'angle autour de 100° N). Ceci peut s'expliquer à la fois par le fait que les deux racines créent une anomalie étendue, mais aussi par le fait que la source excite le sol avec une certaine ouverture d'angle.

Tout comme les résultats obtenus en laboratoire, l'étude spectrale à l'aide d'outils de bases (amplitude et position du pic spectral) n'est pas concluante. La méthodologie à base de traitement en ondelettes ou bien en analyse en composantes principales est une perspective de la thèse en cours de développement car elle nécessite d'être suffisamment bien paramétrée pour l'appliquer sur de nombreux signaux. Elle sera mise à profit une fois achevée afin de pallier l'approche trop simpliste de l'étude du spectre uniquement à partir de sa fréquence fondamentale. Ce dernier point sera discuté dans les limites observées en conclusion.

Cette expérience nécessite d'être reproduite sur un arbre de plus grosse dimension pour valider les résultats obtenus, l'arbre d'étude proposé ne disposant relativement que de petites racines. Ce point sera traité dans le chapitre [7](#).

5.4 Conclusions, limites et perspectives

Nous formulons ici les conclusions des études menées en laboratoire et en conditions semi-controlées pour l'approche acoustique. Cette approche, inspirée d'une technique mise en place lors de prestations du bureau d'étude RINNTECH, est intéressante pour sa rapidité de mise en place et son faible coût. Cependant, cette méthode repose sur de nombreuses hypothèses que nous avons vérifiées au cours de ce chapitre.

Réflexion sur la validité de l'hypothèse d'une racine assimilée à un guide d'onde

L'hypothèse la plus importante est vraisemblablement le fait de considérer que la racine se comporte comme un guide d'onde vers le tronc. Cela implique qu'elle possède à la fois :

1. Des propriétés d'impédance acoustique permettant de satisfaire la condition de réflexion à l'interface racine-sol pour contraindre l'onde à se propager au sein de la racine ;
2. Des propriétés favorables à la propagation de l'onde sur des distances suffisamment grandes pour être conduite jusqu'au tronc.

L'étude sur des échantillons en laboratoire a montré des différences notables des propriétés d'impédance acoustique entre un sol limoneux à une teneur en eau naturelle (environ 10%) et une racine ligneuse. Ces différences sont plus ou moins grandes suivant l'état physico-chimique de l'échantillon considéré (teneur en eau, taux de décomposition,...) bien que l'étude ne puisse pas statistiquement (sur un grand nombre d'échantillons) être reliée à ces paramètres. Les coefficients de réflexion en énergie, à incidence normale, sont contenus dans une large gamme située entre $R = 13$ à 95%. Lorsque l'on considère des vitesses de propagation de l'ordre de celles obtenues pour un bois sain, alors R tend à être plus faible et donc à privilégier la transmission de l'énergie. A noter tout de même que les coefficients de réflexion sont déterminés pour des mesures effectuées dans la direction longitudinale de la racine, direction pour laquelle les vitesses sont les plus élevées.

Finalement les deux conditions (1) et (2) ne peuvent pas être respectées simultanément de façon optimale. Soit le contraste d'impédance acoustique est faible, alors l'énergie sera bien transmise mais la qualité du guide sera moins bonne. Soit le guide est de bonne qualité, alors la transmission de l'énergie du sol vers la racine est de moins bonne qualité. Ces constats sont à modérer en considérant qu'en réalité, une racine primaire, de diamètre important (≥ 10 cm), est rarement rectiligne et que son diamètre n'est pas constant car il existe des ramifications. Ces ramifications induisent certainement une perte d'énergie lors de la propagation dans ce guide d'onde. D'autre part, une racine ligneuse est composée en réalité de différentes couches (écorce, aubier, cœur) qui ne possèdent certainement pas les mêmes propriétés d'impédance acoustique.

Les résultats de l'étude en tomographie, pour laquelle une racine est disposée très superficiellement (6 cm, ce qui est une condition favorable mais pas forcément rencontrée in-situ), font apparaître que la vitesse à travers la racine est jusqu'à 7 fois plus élevée dans la direction la plus favorable (racine longitudinale à la direction source-récepteur) et 5 fois lorsque dans la direction transverse. L'amplitude en revanche n'est pas significativement affectée. Toujours d'après l'expérience en tomographie, en travaillant à des fréquences à la frontière entre l'acoustique et l'ultrasonique, il semble que l'atténuation (proportionnelle à l'amplitude reçue A_{RMS}) soit sensiblement identique dans le matériau bois et dans le sol. C'est la raison pour laquelle il est difficile de les discriminer à partir de l'étude spectrale. Aucun mode de propagation vraiment discriminant a pu être mis en évidence avec l'analyse de Fourier. A partir de l'analyse en

ondelettes, des modifications mineures semblent montrer que la racine transporte mieux l'onde transmise pour des fréquences inférieures à 20 kHz. L'analyse en ACP discrimine bien les signaux pour des fréquences discrétisées, c'est à dire qu'aucune tendance ne permet de montrer que la racine transmet mieux l'onde sur une gamme de fréquences, excepté à basse fréquences en accord avec l'analyse en ondelettes. Si cela se vérifie lors de futures expériences in-situ, il serait alors intéressant d'envisager de travailler avec des transducteurs de fréquence centrale plus basse.

La mise en pratique et les difficultés rencontrées

L'étude menée en conditions semi-contrôlées a permis de confronter les mesures en laboratoire avec l'approche de tomographie pour laquelle les transducteurs de réception sont directement fixés sur le tronc de l'arbre. Chacune des hypothèses et facteurs influençant la mesure énoncée précédemment imposent d'interpréter les résultats de détection avec prudence.

D'un point de vue général, plus on dispose d'informations, plus il est aisé d'interpréter les données. La vitesse est clairement la quantité la plus pertinente à interpréter puisqu'elle est conditionnée par un pointé que l'on réalise manuellement. Ce pointé n'est réalisé que lorsque le signal est de bonne qualité. Dans ce cas, si la variation angulaire de la vitesse calculée dépasse un intervalle de confiance (défini par les erreurs sur le positionnement, le pointé et la tortuosité de la racine), il est alors vraisemblable que l'origine puisse être attribuée à la présence de racines dans le sol. Les autres quantités physiques sont conditionnées par d'autres facteurs, en particulier la source et la méthodologie de traitement introduisant des incertitudes initiales.

L'étude spectrale n'a pas donné à ce stade de résultat convaincant mais demande à être approfondie car elle permet théoriquement de traduire de multiples conséquences de la propagation à travers le milieu. Son étude a fait l'objet de nombreux développements successifs, à commencer par la simple détermination de la fréquence dominante et son amplitude, puis par l'analyse en ondelettes, et enfin par l'analyse en composantes principales. Les deux dernières méthodes semblent montrer des perspectives intéressantes mais demandent à être renouvelées sur d'autres expériences afin de mieux les paramétrer en vue de les appliquer sur les cas réels. La propagation de la source vers le tronc reflète en réalité une somme de réflexions et réfractions tout au long du parcours. En théorie lorsque ces phénomènes se produisent, les fréquences de propagation sont affectées. En considérant que l'onde se propage à travers la racine, il est donc probable d'obtenir des modes caractéristiques liés aux multiples réflexions à l'interface racine-sol, d'où l'importance de l'étude des propriétés spectrales.

Réflexions sur des perspectives d'amélioration du dispositif d'acquisition

Choix de la fréquence des transducteurs

Comme évoqué précédemment, la propagation d'une excitation source, enregistrée dans la gamme de fréquence théorique des transducteurs utilisés (approximativement entre 10^4 et 10^5 kHz) permet d'enregistrer un signal sur le tronc et de retrouver les vitesses de propagation mais ne permet pas de différencier dans le domaine spectral la propagation entre la racine et le sol. En ce sens, il serait intéressant d'utiliser des transducteurs de fréquence centrale plus basse, qui permettraient d'étudier d'autres fréquences de propagation plus discriminantes. De plus, abaisser la fréquence permettrait de s'assurer de la bonne transmission du signal à travers le sol en augmentant sensiblement la profondeur d'investigation. A ce jour, nous disposons de capteurs de fréquences centrales de 24 et 54 kHz et des essais pourraient être menés à partir de capteurs large bande [5-25]kHz. Travailler à des fréquences plus basses implique cependant des modifications de la résolution verticale, c'est-à-dire la capacité à séparer deux horizons proches en profondeur. A titre indicatif, pour une fréquence maximale f_{max} de 5 kHz et pour un milieu

de vitesse de 500 m/s (ordre de grandeur obtenu en laboratoire et in-situ), la résolution verticale, c'est à dire le diamètre minimum de la racine pouvant être séparé est de 10 cm (d'après la relation suivante $\lambda = \frac{V}{f_{max}}$) ce qui est suffisant pour distinguer des racines primaires (sur des arbres de grande dimension) et ainsi répondre à notre questionnement.

Géométrie et positionnement des capteurs

Une autre perspective intéressante concerne la géométrie et le principe de la mesure en acoustique utilisé pour la détection. Il semble limitant de considérer uniquement le trajet de l'onde à travers la racine et l'enregistrement sur le tronc afin de la localiser. Certes, nous sommes arrivés à la conclusion que l'onde de fréquence située à la limite basse des ultrasons se propage mieux en vitesse dans un matériau de bois de racine que dans un sol limoneux, la vitesse étant plus élevée et l'onde étant moins atténuée. Néanmoins, d'après l'expérience menée en laboratoire, nous avons montré qu'il existe un fort contraste d'impédance acoustique à l'interface sol-racine provoquant dans certaines conditions une forte réflexion d'énergie de l'onde. Afin de tenir compte de ce constat, il serait intéressant d'envisager de positionner des transducteurs à distances régulières le long du parcours afin de mesurer d'éventuelles réflexions à l'interface sol-racine de l'onde incidente. Ceci se manifesterait clairement par des trains d'ondes secondaires sur le signal, ce que la transformée en ondelettes permet idéalement d'identifier. De plus, ces capteurs permettraient de s'assurer que l'onde reçue sur le tronc n'est pas issue de la propagation directe le long de l'interface air/sol.

Nous pouvons aller encore plus loin dans l'acquisition en positionnant un transducteur de réception à proximité de la position source. Ceci permettrait à la fois de lever l'incertitude sur la non-normalité de la source en la caractérisant pour chaque pas de tir. Parallèlement, ce transducteur positionné en pied de source permettrait potentiellement de mesurer la réflexion sur le tronc sous forme d'une onde régressive (dans la direction opposée de l'onde progressive générée).

La tomographie acoustique sol/tronc peut être maintenant testée en conditions réelles sur une digue, ce qui est exposé dans le partie de valorisation [7](#).

CHAPITRE 6

Imagerie géoélectrique

Sommaire

6.1	Mise en évidence d'effets de polarisation sur des échantillons racinaires	126
6.1.a	Introduction	126
6.1.b	Matériel et méthodes	128
6.1.c	Résultats et interprétation	133
6.2	Influence de la masse racinaire	137
6.2.a	Résultats	137
6.2.b	Cartographie in-situ	141
6.2.c	Conclusion sur l'influence de la fréquence d'injection et de la masse racinaire sur le potentiel de détection	145
6.3	Suivi géoélectrique de l'évolution temporelle en fonction de la teneur en eau du sol	147
6.3.a	Introduction	147
6.3.b	Matériel et méthodes	147
6.3.c	Résultats et discussions	151
6.3.d	Conclusion et perspectives	158
6.4	Conclusions, limites et perspectives	159

Au cours de ce chapitre, nous expliciterons les résultats obtenus à partir de la méthode de tomographie de polarisation provoquée. Dans la majorité des expériences, nous avons combiné les acquisitions en polarisation provoquée spectrale (PPS) et temporelle (PPT) afin d'identifier leurs points forts et leurs limites en vue de leurs mises en place in-situ. Les mesures sont réalisées en deux temps : (i) en laboratoire sur des échantillons de racines, de sol et de racines enterrées ; (ii) en conditions semi-contrôlées sur un dispositif sur lequel sont implantés des peupliers dans un sol de nature homogène (cf. chapitre 4).

Dans un premier temps, nous réalisons des essais en laboratoire afin de mettre en évidence des effets de polarisation sur des échantillons racinaires (cf. section 6.1). A l'aide d'un dispositif simplifié, les essais sont menés en polarisation provoquée spectrale afin de retrouver les résultats connus de la littérature. En complément et pour combler un manque de la littérature existante, ces échantillons sont aussi analysées, en polarisation provoquée temporelle.

Au cours de la même étude et en faisant varier la masse d'échantillons enterrés (cf. section 6.2), nous proposons d'estimer la limite pour laquelle la proportion de masse racinaire, par rapport à celle du sol, ne permet plus d'obtenir de contraste de résistivité complexe. Nous avons porté une réflexion sur les paramètres intrinsèques à la racine tels que sa teneur en eau et son état de décomposition. Ceci sera détaillé dans la section sur les limites observées (cf. section 6.2.c).

Enfin, une étude a été menée autour de la question de l'état de teneur en eau du sol (cf. section 6.3). D'après notre bibliographie, de nombreuses études portent un intérêt à l'utilisation de l'activité bioélectrique naturelle des systèmes racinaires pour la localisation des zones de

fortes densités racinaires. Cependant la plupart des études se limitent à la mesure du module de la résistivité. Nous souhaitons aller plus loin en effectuant des essais in-situ de polarisation provoquée temporelle.

6.1 Mise en évidence d'effets de polarisation sur des échantillons racinaires

6.1.a Introduction

i Origine, mesure de la polarisation et éléments de comparaison des approches spectrale et temporelle pour l'étude des systèmes racinaires

On distingue les instruments qui permettent la mesure en polarisation provoquée spectrale (PPS), tels que le LIPPMANN ou le SIPFUCHS III , des instruments de polarisation provoquée temporelle (PPT) tel que le SYSCAL Pro (utilisés au cours de ces essais). En domaine temporel, ce phénomène capacitif se manifeste par un potentiel résiduel après avoir coupé le courant d'injection, alors que dans le domaine fréquentiel, c'est un décalage de phase entre le courant injecté (de forme sinusoïdal) avec la réponse du potentiel mesuré. Cette distinction, purement instrumentale, induit trois principales conséquences dont il faudra tenir compte pour ensuite conclure sur le choix de la méthode la plus adaptée à la prospection de racine ;

- La première conséquence est que l'étendue des gammes de fréquences accessibles dans les domaine temporel et fréquentiel sont différentes et permettent donc d'observer différemment les mécanismes de polarisation. La PPS permet d'observer les mécanismes contenus entre 0,001 Hz et 12 kHz alors que la PPT se limite à la gamme de fréquence entre 1/4 Hz et 64 kHz selon [Florsch et al. \(2011\)](#). Ce constat est un premier critère de différenciation des deux méthodes dont il faut tenir compte afin de juger de la pertinence de l'utilisation de la PPS ou de la PPT pour la détection de racine.
- La seconde conséquence se situe sur la richesse du résultat obtenu : la polarisation provoquée temporelle permet d'obtenir une cartographie (x,y), ou une section 2D (x,z) d'un sol à une unique fréquence, celle fixée par la durée des créneaux d'injection. Lors de mesures en polarisation provoquée spectrale, il est possible de programmer la plage et l'échantillonnage des fréquences désirées. La section de résistivité complexe obtenue peut être représentée pour chacune des fréquences ;
- La dernière conséquence concerne les contraintes matérielles. Certaines études préconisent l'utilisation d'électrodes impolarisables afin de ne pas ajouter une polarisation indésirable induite par le système de mesure à celle recherchée. Par l'approche temporelle, le courant d'injection est coupé lorsque la mesure du potentiel est en cours, ce qui permet d'éviter les effets d'induction électromagnétique. En conditions réelles, les terrains peuvent être fortement compactés (particulièrement en crête de digue) et il est bien plus pratique d'implanter des électrodes polarisables, généralement composées de tiges en acier inoxydable et donc moins fragiles pour les enfoncer sur une longueur suffisante. D'autre part, les câbles utilisés en PPS sont fragiles (en fibre optique) et plus nombreux car il est nécessaire de séparer les câbles pour l'injection de ceux pour la mesure du potentiel. L'approche de PPT semble plus aisée à mettre en place sur une digue.

La difficulté de la compréhension d'une mesure provient du cumul des effets. A la fois, les différents mécanismes de polarisation (d'électrodes et de membrane) se superposent mais aussi les mécanismes liés au sol se superposent à ceux produits par les racines. C'est la raison pour

laquelle, si l'on veut discriminer une racine dans un sol, il est indispensable de bien comprendre dans quelles mesures un mécanisme l'emporte sur un autre, à quelle fréquence et pour quel contraste d'amplitude.

Des effets indésirables de polarisation d'électrodes apparaissent, particulièrement à basse fréquence. Ordre de grandeur (cf. chap. 2 section 2.2, § iii)

Dans le sol sélectionné pour cette expérience, et plus généralement dans un contexte de digues, la fraction argileuse n'est en général pas négligeable. Les argiles ont des propriétés remarquables qui créent une polarisation de membrane. Toutes les études citées en bibliographie (cf. chap. 2 section 2.2, § v) semblent s'accorder sur le fait que (i) les effets de polarisation dans le bois peuvent être bien plus importants en amplitude que ceux observés dans les sols de types argileux et que (ii) ces effets de polarisation sont plutôt situés à basses fréquences, dans la gamme de 1 Hz et 25 Hz et peuvent en priorité être assimilés à des mécanismes de polarisation de membrane. Cependant, l'amplitude des effets de polarisation constatés est très variable selon les études (Tableau 6.3) et ne permet pas de juger, de façon satisfaisante, de l'efficacité de cette méthode. De plus, bien que les effets de polarisation soient situés à basses fréquences et donc théoriquement accessibles par une approche temporelle, aucune des études préalablement identifiées lors de la bibliographie ne propose de les mettre en avant expérimentalement par l'approche de PPT.

ii Originalité, objectifs et plan de l'étude

Le travail est réalisé sur un dispositif relativement simplifié (qui sera argumenté dans la partie matériel et méthodes) comparativement à ceux plus récemment développés en particulier pour des études portant sur la caractérisation du bois. Ceci permet de tester l'efficacité d'une nouvelle méthodologie d'acquisition rapide et peu coûteuse à mettre en place.

Les éléments de comparaison des approches temporelle et fréquentielle énoncés précédemment demandent à être vérifiés en pratique, mais semblent tout de même converger vers la pertinence de l'utilisation de la polarisation provoquée temporelle pour la détection de racines. L'originalité de notre étude porte sur l'utilisation des deux domaines (PPT et PPS) à la fois pour la mise en évidence des effets de polarisation intrinsèque mais aussi de l'influence de la masse racinaire enfouie. Ceci permet de répondre à deux objectifs :

- le premier est de valider ou non la manifestation des mécanismes de polarisation de membranes, par les deux approches, en confrontant les fréquences et l'amplitude de la fréquence dominante avec la littérature existante ;
- le second objectif, découlant du précédent, est d'énoncer le domaine préférentiel à utiliser pour les prospections in-situ afin de détecter la présence de systèmes racinaires.

Parallèlement, des développements de l'inversion des données temporelles par un modèle semi-empirique, ici le modèle de Cole-Cole généralisé doit apporter un complément en donnant un sens physique pour l'interprétation. Ceci vient enrichir les connaissances des modèles existants dont le plus connu est celui de Dalton (1995) qui propose une analogie avec un circuit électrique des systèmes racinaires et montre une corrélation entre la capacité électrique et la masse racinaire.

Aussi, en faisant varier la masse d'échantillons enterrés (cf. section 6.2), nous proposons de déterminer la limite pour laquelle la proportion de masse racinaire par rapport à celle du sol ne permet plus d'obtenir de contraste de résistivité complexe.

Enfin, les résultats obtenus sur des échantillons racinaires permettent d'obtenir une approximation du comportement des matériaux que l'on peut rencontrer en conditions in-situ, mais ne reflètent pas pour autant la réalité, en particulier du caractère vivant des zones racinaires. Cette étude s'ouvre donc sur une expérience menée in-situ, sur un dispositif en conditions semi-contrôlées venant en appui aux résultats obtenus en laboratoire. Les objectifs sont identiques à savoir, l'identification de la fréquence pour laquelle les contrastes de polarisations sont les plus élevés et par conséquent permettent la discrimination racine/sol.

Initialement cette étude avait d'autres objectifs, qui portaient sur la quantification des effets des paramètres intrinsèques à la racine (teneur en eau et état de décomposition) sur le signal mesuré mais malheureusement ils n'ont pas abouti, à ce jour, à des résultats satisfaisants. D'autres sont en cours de réalisation car ils ont nécessité des réglages instrumentaux qui sont intervenus très récemment (exemple du Fullwave). Ces limites et essais en cours constituent néanmoins une part importante du temps consacré à l'étude des propriétés électriques en laboratoire et seront tout de même discutés au cours de cette étude et repris dans les limites et conclusions.

6.1.b Matériel et méthodes

i Préparation des échantillons

Les échantillons utilisés au cours de cette expérience sont issus des supports expérimentaux (cf. chapitre 4). Nous disposons principalement d'échantillons de racines saines dont les caractéristiques sont détaillées dans le tableau 6.1. Au total, 11 échantillons ont été préparés pour cette étude.

Certains des échantillons étaient à l'état sec au début de l'expérience car ils avaient fait l'objet d'études préalables (Spectroscopie Proche Infrarouge SPIR) afin d'identifier leur composition chimique) et avaient été placés à l'air libre durant quelques semaines précédant les mesures. Pour ces échantillons, même à l'aide d'une unité de puissance permettant l'application de fort voltage, le niveau du signal transmis était insuffisant. Ainsi, ces racines ont été partiellement saturées, jusqu'à atteindre une teneur en eau de l'ordre de la teneur à l'état frais (teneur en eau déterminée directement à la suite du dessouchage) avant d'effectuer à nouveau les mesures. D'autres échantillons ont été prélevés plus tardivement, puis conservés à l'état frais et n'ont donc pas nécessité de saturation.

Pour la saturation en eau, les échantillons sont immergés dans des cuves remplies d'eau saline (du robinet) durant approximativement 36 h. Après cela, les échantillons ne sont pas complètement saturés en eau (comme ils pourraient l'être à l'aide d'appareillage plus adapté tel qu'une pompe pressant l'eau à travers les pores de l'échantillon), mais cela n'était pas nécessaire dans l'optique de reproduire le plus fidèlement possible des teneurs en eau à l'état frais.

Afin de vérifier la teneur en eau à l'instant de la mesure, les échantillons de racines sont pesés et la valeur est comparée avec la masse à l'état initial. En supposant que les variations de masse sont provoquées par la perte en eau de la racine, il est possible de déterminer les écarts par rapport à la teneur en eau naturelle. D'après le tableau 6.1 les écarts sont de plus ou moins 10%. La teneur en eau absolue des racines a été estimée autour de 30% à $\pm 10\%$ sur l'ensemble des échantillons étudiés d'après l'étude SPIR.

Code Racine	État (F = frais, I= immersion)	Masse après immersion (g) - (Masse à l'état frais)	Diamètre (mm)
3P2R	F	12.33	8
8T4R	F	49.15	25
7P1R	F	75.80	25
7P1R	F	91.05	25
3P2R	F	96.02	35
7P1R	F	103.01	30
3P2R	F	164.09	50
T48	I	145.62 - (159.43)	8
PT48	I	375.36 - (347.20)	8
FT06	I	163.30 - (170.64)	6
FT08	I	159.54 - (167.42)	8

Tableau 6.1 – *Caractéristiques des échantillons de racines utilisés lors de l'expérience en laboratoire*

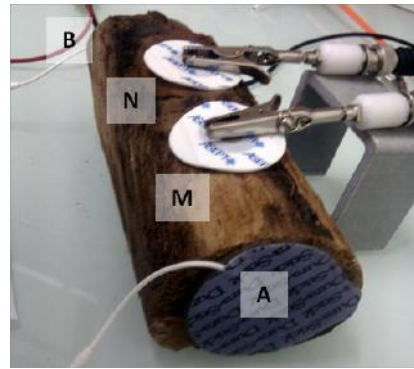
ii Dispositif pour la mesure intrinsèque dans la direction longitudinale de l'échantillon

Pour l'analyse des échantillons de racine, le dispositif expérimental mis en place est celui proposé par [Cosenza et al. \(2007\)](#) ou [Ghorbani et al. \(2009\)](#) et utilisé pour leurs mesures sur des échantillons d'argilites (Tournemire et Bure). Ce dispositif utilise des électrodes médicales en film de carbone placées en contact direct avec l'échantillon pour injecter le courant. L'injection se fait aux deux extrémités de la racine au moyen de patches sur lesquels sont disposée une grille métallique afin d'obtenir une injection homogène à travers la racine. Deux autres électrodes de type électrocardiogramme (ECG), impolarisables, formées du couple Ag/AgCl, sont placées dans la longueur de racine pour la mesure de la différence de potentiel en un point afin de déterminer le coefficient géométrique. Les électrodes utilisées de type ECG contiennent un agent de couplage (gel agar-agar) permettant un bon contact entre la racine et l'électrode.

Le premier critère pour lequel ce dispositif est utilisé est qu'il se réalise rapidement et à faible coût. Leurs dispositions forment un dispositif de type Wenner α (lorsque cela est possible), classiquement utilisé pour la réalisation de mesures électriques avec quatre électrodes (résistivité ou bien PP). L'échantillon est donc analysé dans sa direction longitudinale comme l'illustre la figure 6.1. Il n'est pas tout le temps possible de réaliser un dispositif avec la distance inter-électrode constante (Wenner α). Dans ce cas, le terme de résistivité doit être corrigé du facteur géométrique. D'après [Martin \(2009a\)](#), la géométrie de l'échantillon a une influence sur la mesure, en particulier la proportion entre la longueur et le diamètre. Cette étude préconise que la distance entre les électrodes de mesures du potentiel soit deux fois plus élevée que le diamètre de la racine analysée afin d'obtenir une répartition homogène des lignes de courant à travers l'échantillon. Les proportions en diamètre et longueur des échantillons analysés respectaient bien cette condition.

La cellule de mesure développée au BAM (Federal Institute for Materials Research and Testing) ([Martin, 2012](#)) est certainement plus performante puisqu'elle permet de respecter des conditions expérimentales contrôlées de température, d'humidité et de CO_2 durant toute la durée de la mesure et de l'expérience. Cependant, ce dispositif est constitué d'une cellule dans laquelle est disposé un échantillon de dimension calibré, ce qui implique nécessairement une étape préalable d'usinage de l'échantillon à mesurer. Dans notre cas, l'échantillon est conservé dans son intégralité, ce qui permet de ne pas privilégier une zone particulière (telle que l'aubier ou bien le duramen) et d'effectuer une mesure de la racine dans son ensemble. Une approche simplifiée

FIGURE 6.1 – *Mesure en transmission à l'aide d'un dispositif de type Wenner α constitué d'électrodes médicales – AB sont les électrodes d'injections (film de Carbone, Ag/AgCl), et MN les électrodes de mesures du potentiel*



a aussi été utilisée dans l'étude de [Zanetti et al. \(2011b\)](#) où les essais sur les échantillons de racines étaient effectués à l'aide de clous implantés dans la racine servant d'électrodes à la fois d'injection et de mesure de potentiel. Cependant, certaines études montrent les effets indésirables de cette approche qui implique à la fois un biais sur la mesure du fait des résistances de prise des électrodes, mais aussi car les électrodes d'injection sont enfoncées à une certaine profondeur et donc en contact avec une zone précise de la racine. Le dispositif à l'aide d'électrodes d'injection formées par des patches permet de s'abstraire de ce problème.

Une dernière méthode consiste à plonger l'échantillon dans une solution aqueuse. Dans ce cas les circulations d'eau (et donc la génération d'un courant électrique) ne se limitent pas aux ions contenus dans l'échantillon, mais aussi de la solution vers l'échantillon ce qui fausse la mesure. A nouveau, le dispositif retenu permet de s'affranchir de ce problème.

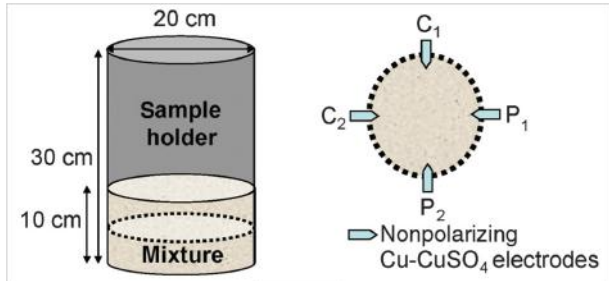
Les mesures de polarisation provoquée spectrale sont réalisées à partir du SIP FUCHS III dans la gamme de fréquence entre 0,001 Hz et 10^3 Hz. Le courant qui traverse l'échantillon racinaire dépend du voltage appliqué mais aussi de la taille de l'échantillon. Chaque échantillon est analysé trois fois consécutivement afin d'évaluer la reproductibilité de la mesure. En moyenne sur chacun des échantillons, la mesure était stable avec des variations maximales de 0,1 mrad entre chaque répétition de mesures. Ainsi, les courbes présentées résultent de la moyenne des quatre mesures effectuées.

Les mesures de polarisation provoquée temporelle sont réalisées à partir du SYSCAL Pro pour des durées d'injection variant de 1 à 8 s. Le courant qui traverse l'échantillon racinaire dépend du voltage appliqué et de la taille de l'échantillon. Plus l'échantillon est grand, plus le voltage nécessaire doit être élevé pour avoir une quantité suffisante de courant qui le traverse. Pour cette raison, le voltage délivré est fixé librement par l'instrument afin d'avoir un courant minimum traversant.

iii Dispositif expérimental pour la mesure dans la direction radiale de racines immergées dans le sol

Pour la mesure du signal issue de racines immergées dans le sol (figure 6.2b), les mesures sont réalisées à partir d'un quadripôle d'électrodes placées selon une configuration dite équatoriale, sur un porte échantillon cylindrique dont les dimensions sont détaillées dans le tableau 6.2. Ce dispositif a été utilisé pour des études préalables, en particulier pour des essais portant sur la caractérisation des propriétés électriques d'argiles ([Okay, 2011](#)). En général, la formule empirique qui permet de calculer le coefficient géométrique est valable à condition qu'il s'agisse d'un positionnement des électrodes sur une interface plane (demi-espace infini). Or dans ce cas, la position des électrodes de mesure est, sur une surface cylindrique, gouvernée par la géométrie du porte-échantillon utilisé. En conséquence, cette géométrie nécessite un calcul plus élaboré, réalisé par [Okay \(2011\)](#) à partir de COMSOL® et ayant pour valeur $K=0,45$. Des électrodes impolarisables formées par le couple Cuivre-Sulfate de Cuivre ($Cu - CuSO_4$) sont

utilisées pour la mesure de potentiel, alors que des électrodes en acier inoxydable permettent l'injection de courant.



(a) Description du porte échantillon tel qu'il était utilisé par Okay (2011)

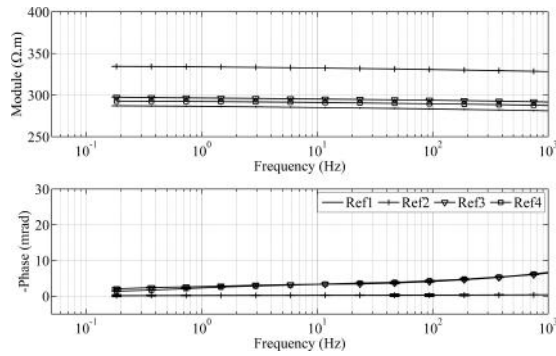


(b) Exemple de mesure PPS avec le SIPFUCHS (2) montrant la géométrie des électrodes d'injection A et B, de mesure de potentiel M et N; (point milieu = câble jaune) et (1) de la position centrale de l'échantillon racinaire

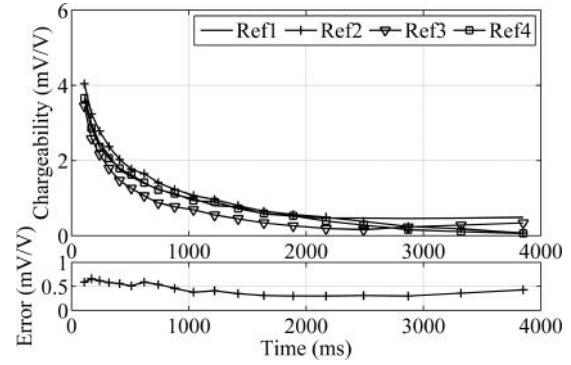
FIGURE 6.2 – Dispositif de mesure de la polarisation dans la direction transverse à un échantillon de racine enfoui dans un sol

Le porte échantillon est rempli d'un matériau fin homogène détaillé dans le tableau 6.2. Ce matériau est majoritairement limoneux avec une fraction argileuse. La première mesure est qualifiée de référence. Elle est réalisée dans le porte échantillon rempli uniquement de matériau de sol. Des échantillons de même longueur (20 cm) et de diamètres variables sont ensuite introduits dans la cuve (figure 6.2). Dans ce cas, l'échantillon racinaire est intégré dans sa direction radiale, direction perpendiculaire à celle de la mesure directe sur l'échantillon. Au cours de l'expérience lorsque les racines sont insérées du plus petit diamètre au plus gros, le milieu est naturellement perturbé. Afin d'évaluer la dérive, quatre mesures intermédiaires sont réalisées sur le sol seul à des intervalles réguliers. Ces étapes sont numérotées par la suite *Ref1* à *Ref4*.

Des essais sur des résistances sont effectués avant toute mesure sur les échantillons afin de vérifier si le SIPFUCHS est bien calibré. Le cas échéant, l'instrument est réglé afin que les effets de polarisation soient mis à zéro au moment de la mesure. A partir de la figure 6.3, les différences observées entre chacune de ces mesures à 1 Hz atteignent approximativement 0,1 mrad pour le SIP FUCHS III et pour $T_{ON}=4$ s de 0,5 mV/V. Ces valeurs seront utilisées par la suite pour définir les intervalles d'incertitudes.



(a) Répétition de la mesure sur le milieu de sol seul à l'aide du SIPFUCHS III au cours de la journée d'expérience. Les barres d'erreur sont celles calculées par l'appareil. L'absence de barre d'erreur signifie que l'erreur est plus petite que la taille du symbole



(b) Répétition de la mesure sur le milieu de sol seul à l'aide du SYSCAL PRO au cours de la journée d'expérience.

FIGURE 6.3 – Mesure de l'évolution et de la répétabilité de la mesure au cours de l'expérience et détermination des intervalles d'incertitudes pour la mesure PPS et PPT

Pour chaque diamètre de racine, nous réalisons une mesure dans le domaine temporel, en mesurant la décroissance du potentiel en fonction de différentes durées d'injection de 1,4 et 8 s. Lors de chaque mesure, un délai de 0,1 s est appliqué avant la mesure de la décroissance afin de s'abstraire des phénomènes de filtre de l'instrument. Les créneaux d'injection sont symétriques, c'est-à-dire que la décroissance est mesurée sur la même durée que la durée de l'injection avec une discrétisation de la courbe avec un pas de Cole-Cole (uniquement pour l'étude intrinsèque des échantillons) ce qui permet d'obtenir un meilleur rapport signal sur bruit.

Pour la mesure de la polarisation provoquée spectrale, nous conduisons deux séries de mesures, l'une avec le SIPFUCHS III pour déterminer le module et la phase de la conductivité dans la gamme de $0,9 \times 10^{-1}$ Hz et 10^3 Hz, l'autre à partir du LIPPMANN entre 0.26 et 25 Hz.

Granulométrie du sol	Argile	22.7 %
	Limons	51.6 %
	Sable	19.2 %
	Gravier	5.8 %
Instruments	LIPPMANN, SIPFUCHS et SYSCAL PRO	
Porte échantillon	Hauteur	30 cm
	Diamètre	20 cm
	Hauteur moyenne de sol	15 cm
Électrodes	A,B	Acier inoxydable
	M,N	Impolarisables (Cu-CuSO4)
Configuration	Équatorial	
	Geometric factor	K=0.45 (Okay, 2011)
Racine	Echantillon racinaire	Longueur = 20 cm
	Diamètre	variable

Tableau 6.2 – Résumé des paramètres expérimentaux pour l'étude des propriétés électriques d'échantillons de racines

6.1.c Résultats et interprétation

Les résultats expérimentaux sont représentés à partir des spectres du module et de phase de la conductivité dans le domaine spectral. Dans le domaine temporel, l'interprétation est menée, à partir des courbes de décharge après normalisation en divisant par la durée de chaque fenêtre d'intégration de la courbe de décroissance (la chargeabilité est exprimée dans ce cas en mV/V). Des développements de modélisation par la fonction du modèle de Cole-Cole (1941) sont proposés, à la fois pour synthétiser les résultats en quatre paramètres ayant un sens physique, mais aussi pour obtenir un critère de comparaison entre les mesures dans les différents domaines (PPT et PPS). L'inversion des paramètres de polarisation est importante pour la caractérisation de la réponse électrique en fréquence des matériaux organiques. Pour rappel, le modèle de Cole-Cole est défini par les paramètres du module de la résistivité en courant continu Z_0 , de la chargeabilité m , de la constante de temps τ et de relaxation c (cf. chap. 2 section 2.2, § vi).

Il existe une littérature abondante sur l'inversion des paramètres Cole-Cole dans les domaines temporel et fréquentiel à la fois par la méthode des moindres carrés et par l'approche bayésienne (Yuval and Oldenburg, 1997; Routh et al., 1998; Luo and Zhang, 1998; Kemna et al., 2000; Ghorbani et al., 2007; Höning and Tezkan, 2007). Un travail préliminaire a porté sur l'écriture d'un algorithme d'inversion des données temporelles avec Matlab, basée sur la minimisation de la fonction coût en utilisant un critère de moindres carrés. Les valeurs initiales des quatre paramètres du modèle sont contraintes pour qu'il puisse converger dans l'espace des paramètres vers des valeurs physiquement acceptables. Pour cela, Z_0 est fixé par la valeur du module de la résistivité corrigée du coefficient géométrique, tandis que m est fixé entre 0 et 0.1, cette gamme étant définie pour un milieu non métallique d'après Ghorbani et al. (2007) et τ peut varier entre 0.01 et 1000 s selon Loke et al. (2006).

i Mesures dans le domaine fréquentiel

La figure 6.4 montre les résultats de deux mesures : la mesure intrinsèque radiale de l'échantillon de frêne de diamètre 8 cm (échantillon T48) et la mesure dans le porte échantillon contenant le sol seul. Nous ne présentons ici que les résultats obtenus de l'analyse de l'échantillon T48, celui pour lequel l'amplitude des effets de polarisation observés est la plus élevée et les erreurs de mesures sont les plus faibles (d'après l'écart type sur les trois séries de mesures effectuées).

Nous remarquons que les spectres de phase issus de ces mesures sont significativement différents ; leurs différences relatives étant plus élevées que les erreurs instrumentales, mais aussi que l'intervalle de répétabilité (de 0,1 mrad à 1 Hz, déterminé à partir de la figure 6.3). Pour la mesure directe sur l'échantillon racinaire, nous distinguons clairement un maximum local à basse fréquence à environ 0,1 Hz et autour de 9 mrad d'amplitude. Sur le spectre de phase du sol seul (milieu de référence) aucun pic n'est apparent et la phase augmente de façon non linéaire avec l'augmentation de la fréquence, sans atteindre une phase supérieure à 5 mrad sur l'ensemble des fréquences utilisées et dans les conditions de mesure de l'échantillon. A 0,1 Hz, les différences entre l'échantillon de sol et la racine sont d'environ 7 mrad d'amplitude. Les effets du sol comparativement à l'échantillon racinaire prédominent en amplitude sur la phase, entre 4 et 50 Hz et pour toutes les fréquences au delà de 200 Hz. Les fréquences au delà de 100 Hz ne sont pas interprétables car les mesures sont affectées par des effets de couplage électromagnétiques certainement induit par le dispositif. D'ailleurs, il est probable que l'information basse fréquence soit occultée et qu'aucun pic ne soit apparent du fait de la divergence du spectre de phase au delà de 10^2 Hz.

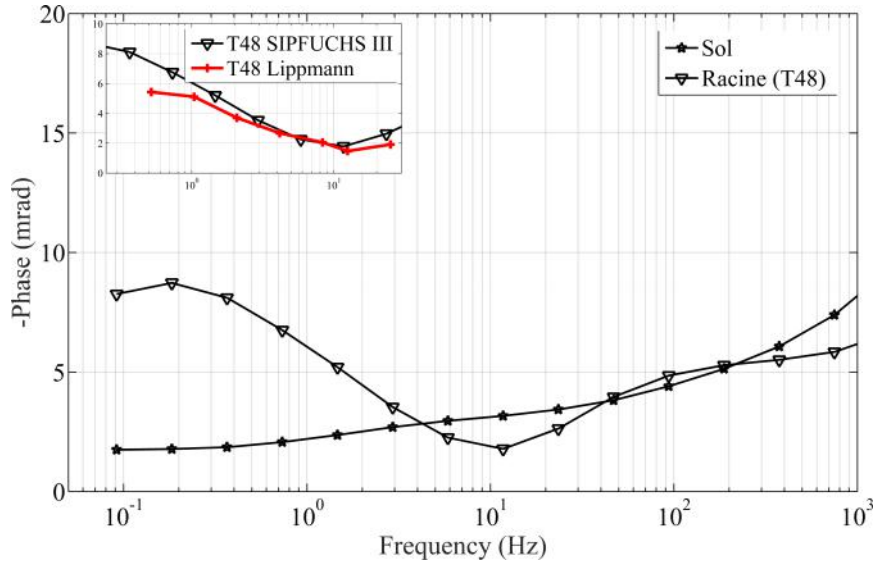


FIGURE 6.4 – Comparaison des spectres de l'échantillon de frêne (échantillon T48) et du sol lors de mesures conduites en laboratoire. Comparaison des mesures obtenues à partir du SIFUCHS (en noir) avec les mesures du LIPPMANN (en rouge). Chaque échantillon est mesuré plusieurs fois afin de s'assurer de la reproductibilité.

Les résultats des mesures effectuées avec le LIPPMANN (figure 6.4) présentent une tendance sensiblement identique à ceux obtenus avec le SIFUCHS. De plus faibles amplitudes de la polarisation ($\simeq 1$ mrad) sont néanmoins observées sur le LIPPMANN en deçà de 1 Hz.

Le résultat le plus important de ces mesures directes est que dans la gamme de fréquence [0.1 10]Hz, le sol et la racine varient de façon opposé : lorsque la fréquence augmente, la phase augmente pour le sol, alors qu'elle diminue sur l'échantillon de racine.

ii Mesures dans le domaine temporel

Les essais dans le domaine temporel ont été initialement conduits à l'aide du mode "Full-wave". De base, la décroissance du potentiel est déterminée uniquement lorsque le courant est coupé. En mode "Full wave", il est possible de mesurer en complément, la charge du milieu durant l'injection de courant. D'après [Olsson et al. \(2015\)](#), au delà du bénéfice de réduction du temps de l'acquisition lorsque l'on utilise 100% du cycle de l'onde, le rapport signal sur bruit des mesures de polarisation provoquée est théoriquement augmenté d'un facteur deux. Cette fonctionnalité a été récemment mise à jour sur le SYSCAL mais des problèmes instrumentaux sont intervenus et les signaux obtenus sont inexploitable. Les données ont été acquises plus conventionnellement par la simple mesure de la décroissance du potentiel.

Ce sont ces résultats que nous représentons ci-dessous, à commencer par la figure 6.5 qui illustre la comparaison entre la décroissance de la chargeabilité du sol avec l'échantillon de racine. Ce résultat est l'équivalent de celui présenté sur la figure 6.4 mais cette fois à partir de la mesure dans le domaine temporel.

Les différences sont significatives entre les deux décroissances en considérant l'intervalle d'incertitude (d'environ 5 mV/V déterminé à partir de la figure 6.3b). La chargeabilité initiale est plus élevée sur l'échantillon de racine. Selon l'évaluation des paramètres de Cole-Cole, la distinction entre l'échantillon de racine et le sol est possible à la fois à partir de la chargeabilité m puisque m_{racine} est approximativement 6 fois supérieure à m_{sol} (0.008 contre 0.05). Aussi, cette différenciation est possible à partir de la constante de temps caractéristique, puisque τ_{racine} est plus élevée (0,49s) que τ_{sol} (0,2s). Ces résultats se retrouvent sur le spectre simulé, où le pic du

spectre de phase de la racine est situé à plus basse fréquence ($f=0,2$ Hz contre $0,9$ Hz, $d = 0,7$ Hz,) et d'amplitude plus forte (12 mrad contre 2 mrad). Notons que ces valeurs sont comparables à celles obtenues lors des mesures directes PPS (figure 6.4).

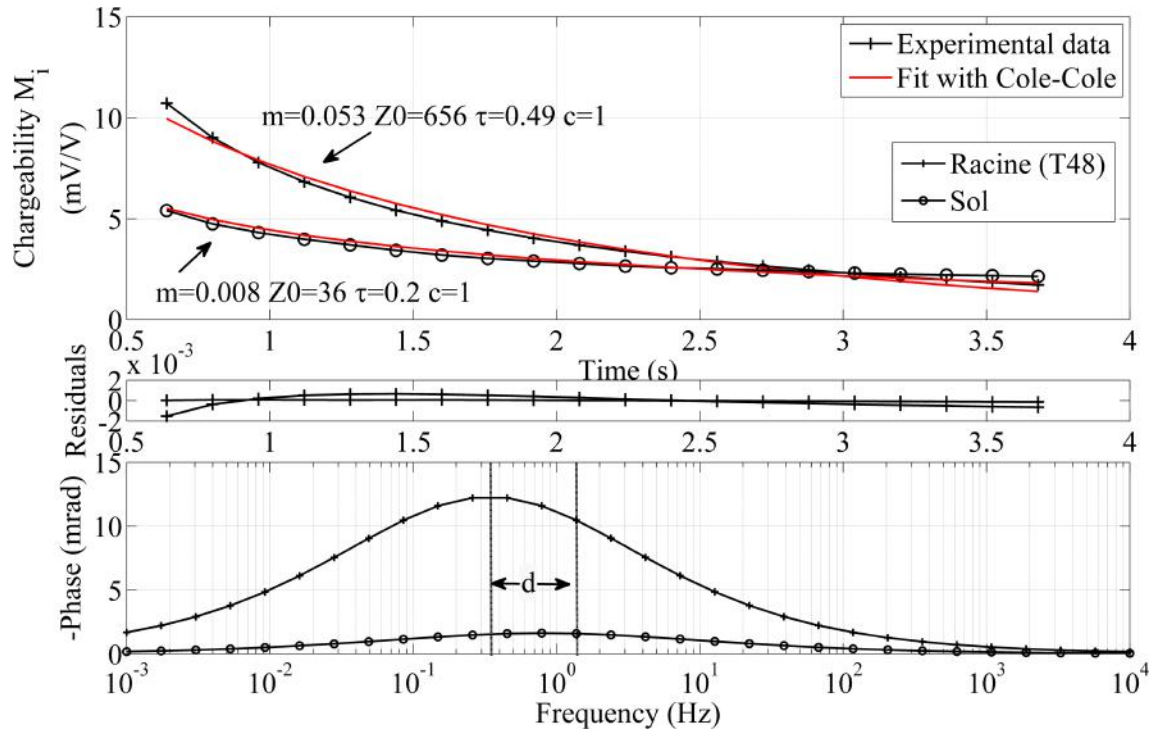


FIGURE 6.5 – Du haut vers le bas : comparaison des décroissances pour l'échantillon racinaire T48 et pour l'échantillon de sol pour une durée d'injection de 4 s ; en ligne pleine rouge, modélisation par un modèle de Cole-Cole généralisé des décroissances. Résidus entre le modèle et les points expérimentaux. Simulation de la réponse PPS en introduisant les quatre paramètres déterminés de la mesure PPT dans le modèle de Cole-Cole

Lorsque nous considérons trois durées d'injection sur l'échantillon T48 (figure 6.6), la chargeabilité au temps initial ne se distingue pas clairement mais il semble que pour un temps d'injection $T_{ON} = 1$ s, elle soit plus grande. Le modèle ne le montre pas bien puisque le premier point de mesure n'est pas situé au même temps (l'abscisse correspond au milieu de la fenêtre d'intégration qui est différente en fonction de la durée d'injection (T_{ON})). Le taux de décroissance permet de différencier les différents temps d'injection, τ variant de 0,3, 0,49 et 0,59 s respectivement pour $T_{ON} = 1, 2, 4$ s. C'est pourquoi sur le spectre de phase simulé, la position du pic spectral se déplace vers les fréquences hautes lorsque le temps d'injection diminue. Le coefficient c est constant et vaut 1.

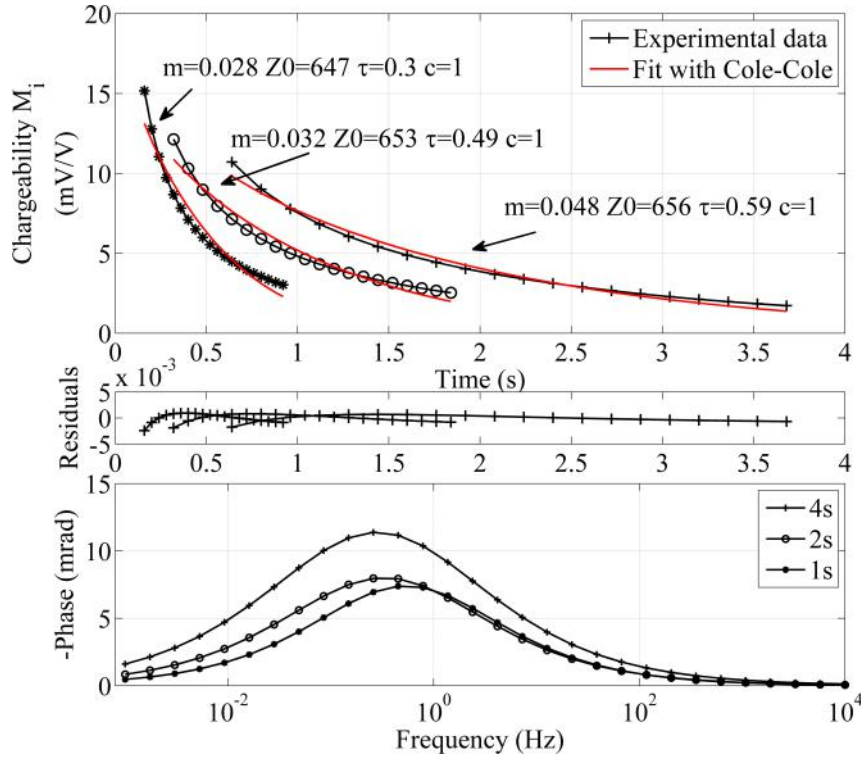


FIGURE 6.6 – Du haut vers le bas : Exemple de décroissance pour l'échantillon racinaire T48 en fonction des différentes durées d'injection de 1 à 4s; en ligne pleine rouge, modélisation par un modèle de Cole-Cole généralisé des décroissances. Résidus entre le modèle et les points expérimentaux. Simulation de la réponse PPS en introduisant les quatre paramètres déterminés de la mesure PPT dans le modèle de Cole-Cole

iii Discussion

Pour les mesures sur les échantillons (intrinsèques) de sol et de racine, le premier critère de différenciation est clairement le module de la résistivité. Ici les racines sont placées dans un état de teneur en eau plus ou moins équivalent à leur état frais réel. Le sol, majoritairement limoneux avec une part argileuse, possède une teneur en eau de l'ordre de 10%. Le module de la résistivité des échantillons racinaires (ρ_{racine}) varie entre 300 et 700 Ωm tandis que ρ_{sol} est de 24 Ωm dans cette expérience. Cette valeur est conforme à la littérature car ρ_{limons} est compris entre 1 et 700 Ωm selon Palacky (1988)). La discrimination sol/racine est possible dans ce cas à partir du terme d'amplitude de la résistivité.

Comme le synthétise le tableau 6.3, les mesures directes sur les échantillons n'ont pas montré un pic de polarisation similaire à celui obtenu lors d'études précédentes sur des échantillons de frêne (ou de chêne) analysés dans la direction radiale. En particulier par rapport à l'étude de Schleifer et al. (2002), l'amplitude est plus faible (10 mrad contre 70 mrad) et le pic de polarisation se trouve à plus basse fréquence (0,1 Hz contre 10 Hz). La principale différence réside dans le taux de saturation en eau de l'échantillon et par conséquent la résistivité (ρ) nettement moins grande pour les autres travaux. Ceci semble montrer logiquement la prépondérance de la teneur en eau des échantillons comme un paramètre significatif dans l'analyse des échantillons sol/racine à la fois en amplitude et sur la position du maximum de phase du pic spectral. De plus, la position et l'amplitude du pic de polarisation de chaque nature d'échantillon est vérifiable à partir des mesures PPT. En effet, en se reportant au tableau 6.3, on constate qu'en simulant la réponse PPS suivant les paramètres de Cole-Cole estimés à partir de la courbe de décharge,

l'amplitude et la fréquence de la polarisation du sol sont comparables avec celles obtenues par la mesure expérimentale PPS.

	Espèce	Direction de la mesure				$\Theta - (\Omega)$
		Axial		Long.		
		A (mrad)	f (Hz)	A(mrad)	f (Hz)	
Martin (2009b)	Chêne	33	0.02	1.8	0.2	Non précisé - (166)
Zanetti et al. (2011b)	Frêne	30	0.2	X	X	$\approx 50\%$ - (77)
Schleifer et al. (2002)	Frêne	70	7	12	7	Saturée - (70)
Mary et al, 2015 ^a	Frêne	10 (12) ^b	0.1 (0.2)	X	X	50% - (656)

Tableau 6.3 – *Synthèse et comparaison avec les travaux de la littérature existante*

a. Article en préparation pour Plant and Soil

b. Réponse PPS simulée

Les paramètres de Cole-Cole ont été déterminés à titre exploratoire. Le modèle adopté est simple (méthode des moindres carrés sans régularisation) et ne converge pas forcément vers la solution vraie. Le paramètre c est tout le temps égal à 1 et dans ce cas on parle de modèle de Debye. Les facteurs les plus discriminants sont le taux de décroissance (τ) et la chargeabilité au temps initial (M_0). Le taux de décroissance sur l'échantillon de racine est plus élevé de l'ordre de 0,3s que pour le sol. La chargeabilité m se distingue entre les deux natures d'échantillons (sol et racine), les racines se chargent plus initialement (M_0 étant plus élevée) et globalement (τ étant plus élevé). L'influence de la durée de l'injection n'est pas claire même s'il semblerait que la chargeabilité initiale soit d'autant plus grande que la durée d'injection décroît. Il convient d'être prudent sur l'interprétation de ces résultats bien que les valeurs estimées soient dans la majorité des cas cohérentes avec les observations. Nous privilégierons, d'interpréter les résultats uniquement à l'aide de la chargeabilité totale M_T .

6.2 Influence de la masse racinaire

En faisant varier la masse introduite d'échantillons enterrés (cf. section 6.2), nous proposons de déterminer la limite pour laquelle la proportion de masse racinaire par rapport à celle du sol ne permet plus d'obtenir de contraste de résistivité complexe. Bien que les résultats soient exprimés en fonction de la masse, cette limite dépend de la proportion, en pourcentage, du volume qu'occupe la racine par rapport à celle du sol. Les échantillons varient entre 8 et 50 mm, soit de 4 à 25% du volume total (ou plus particulièrement de la tranche intégrée par la mesure). Ces proportions de volume racinaire reflètent bien une certaine réalité d'un système racinaire dans un sol pour différentes tailles de racines disposées à différentes profondeurs. La limite de détection, en plus de la proportion de racine intégrée, dépend entre autres des paramètres d'injection. Trois durées d'injections de 2,4 et 8 s sont testées.

6.2.a Résultats

i Mesures dans le domaine fréquentiel

D'après la figure 6.7, le module de la résistivité ρ corrigée du facteur géométrique est contenue sur une large gamme située entre 300 et 700 Ω m. Les positions des fréquences pour lesquelles l'amplitude de la polarisation est maximale, varient entre 10^{-1} (échantillon PT48) et 1 Hz (échantillon FT08) selon les échantillons, alors que le minimum d'amplitude est situé entre 3 (pour l'échantillon PT48) et 11 Hz.

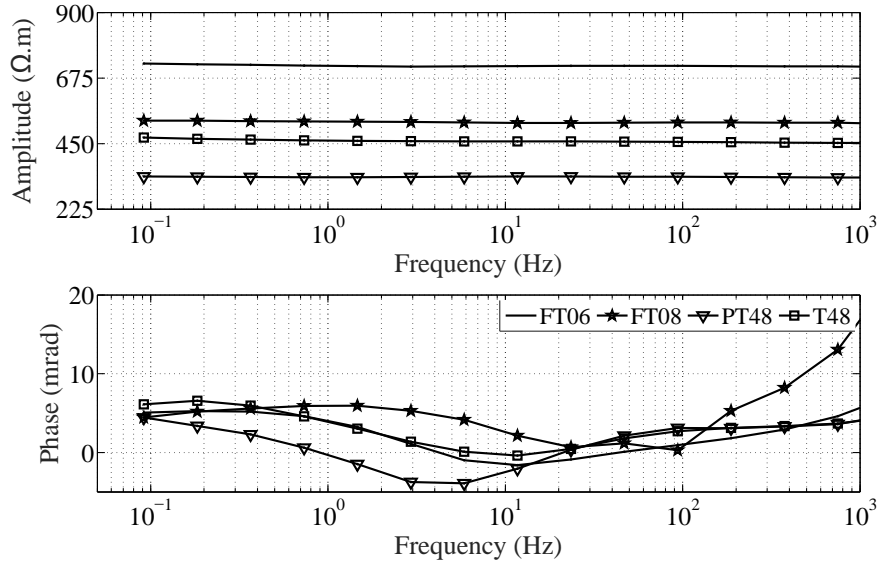


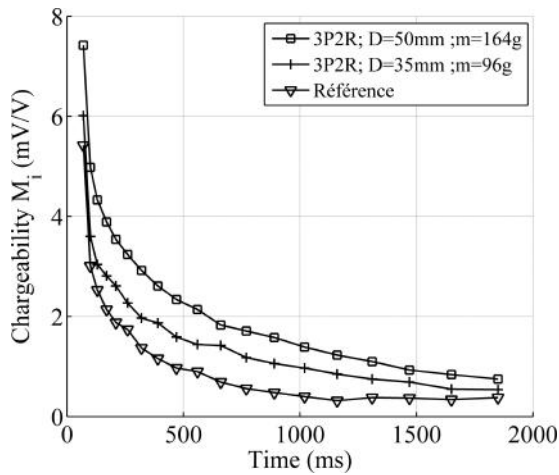
FIGURE 6.7 – Module (en haut) et de phase (en bas) de la conductivité en fonction de la masse racinaire enterrée

L'amplitude maximale de la phase, quel que soit l'échantillon est de 8 mrad. Notons, que cette valeur est plus faible que celle obtenue en mesure directe sur l'échantillon. Sur l'échantillon PT48, la phase passe par des valeurs négatives. Ceci est certainement dû à un biais instrumental. De même que pour l'étude directe sur les échantillons à hautes fréquences, le spectre diverge, ce qui peut s'apparenter à des effets d'induction.

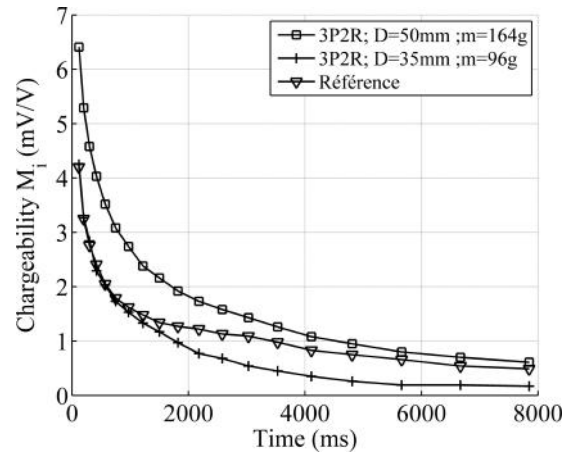
ii Mesures dans le domaine temporel

Pour les mesures sur le porte échantillon, les décroissances sont moins régulières et certains points de mesures sont aberrants (figure 6.8). C'est pour cette raison que la présentation des résultats se limite à la comparaison des courbes de décroissance et non à leur modélisation par la fonction de Cole-Cole, comme proposé dans l'étude de racine isolées (cf. section 6.1.c).

Nous présentons à partir de la figure 6.8 les courbes de décharge de la chargeabilité pour différents diamètres (3,5 cm et 5 cm soit 17.5 et 25% de la proportion totale par rapport au sol du porte échantillon) d'échantillon racinaire en comparaison avec la référence de sol seul et pour différents temps d'injection (2s, figure 6.8a ; 8s, Fig.6.8b). Lorsque le temps d'injection est fixé à 2s, nous remarquons que la décroissance diffère suivant la masse racinaire de l'échantillon enfouie. Plus la masse enfouie est élevée, moins la décroissance est rapide. Cela signifie qu'en présence de racines, lorsque l'on stimule le milieu avec un temps d'injection de 2s, le milieu se décharge plus lentement. Ce constat n'est pas rigoureusement identique lorsque le temps d'injection augmente, en particulier pour 8s d'injection. Les différences sont significatives pour les deux masses racinaires enfouies (échantillons 3P2R, $\geq 0,5$ mV/V) pour une durée d'injection $T_{ON} = 2$ s. Ce constat n'est plus valable pour $T_{ON} = 8$ s où seul l'échantillon de 5 cm de diamètre se distingue de la référence sol.



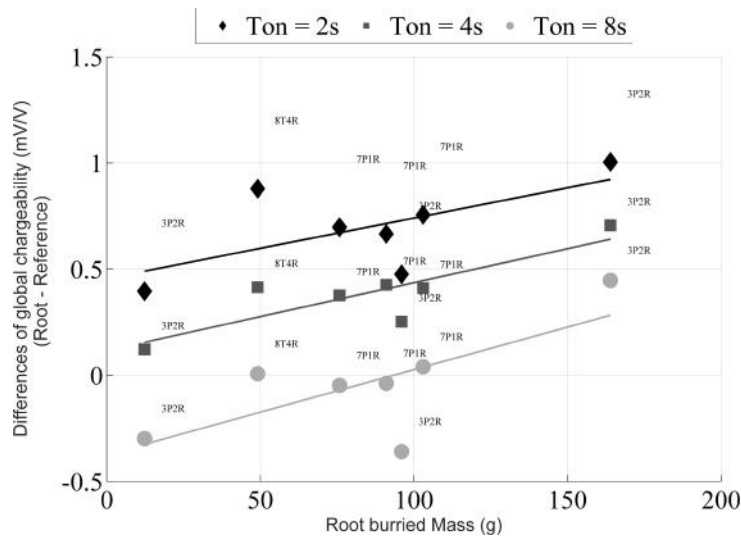
(a) Courbes de décharges temporelles pour un temps d'injection de 2 s



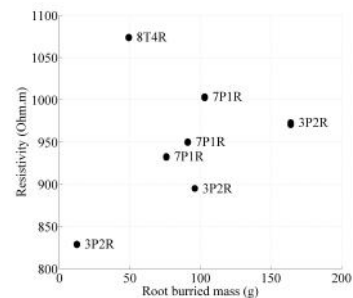
(b) Courbes de décharges temporelles pour un temps d'injection de 8 s

FIGURE 6.8 – Comparaison de la décroissance de potentiel en fonction de la durée de l'injection soit de 2 s ou 8 s sur deux volumes racinaires par rapport au sol

Après normalisation par la durée de la fenêtre d'intégration et en considérant toutes les masses racinaires, nous analysons les différences de chargeabilité totale M_T entre la mesure avec un certain masse d'échantillon racinaire enfoui et la référence (figure 6.9). Tout échantillons sont représentés et pour chaque temps d'injection, on associe une courbe de tendance par régression linéaire par moindres carrés.



(a) Différences(contraste) de chargeabilité totale M_T pour différentes masses racinaires introduites dans le porte échantillon en fonction de la durée d'injection



(b) Module de la résistivité pour différentes masses (diamètres) de racines introduites dans le porte échantillon

FIGURE 6.9 – Observation des différences de chargeabilité (6.9a) et résistivité (6.9b) entre le sol et différentes tailles d'échantillons racinaires lors des mesures de polarisation provoquée temporelles ; influence de la durée d'injection de courant

Nous observons tout d'abord que, quel que soit le temps d'injection, qu'une régression linéaire est satisfaisante pour relier l'évolution de la chargeabilité avec la masse de racine enterrée (70 %

des échantillons étant situés à $\pm 0,1$ mV/V). Plus la masse de racine introduite est élevée, plus le milieu se charge, la différence par rapport à la référence de sol atteignant un maximum de 1 mV/V. D'autre part, les variations du temps d'injection agissent sur l'amplitude des différences observées. Comme constaté sur les courbes de décroissance des figures 6.8a et 6.8b, plus le temps d'injection est court, plus les différences de chargeabilité racine/sol sont grandes. Pour les durées d'injection de 2 et 4 s, la valeur de chargeabilité totale M_T de la racine prédomine sur celle du sol, ce qui n'est pas le cas lorsque le temps d'injection vaut 8 s.

iii Discussion

Nous avons fait le choix d'exprimer les résultats en fonction de la masse racinaire enfouie plutôt que le volume occupé car cela semble être un meilleur indicateur. En effet, la masse racinaire est représentative du type de racine et permet de distinguer les racines ligneuses principales que nous recherchons, des racines fines. Pour un volume équivalent de racines fines et de racines lignifiées, la réponse n'est vraisemblablement pas identique.

Le dernier graphique présenté (figure 6.9) permet de faire la prédiction sur le contraste de chargeabilité pour différentes proportions sol/racine en fonction de la durée d'injection. Les différences observées sont relativement faibles puisque le maximum atteint 1 mV/V pour $T_{ON}=2$ s pour une proportion de racine d'environ 25% du volume total.

La comparaison entre les mesures intrinsèques (directes sur l'échantillon) et réalisées sur le porte échantillon révèle une bonne cohérence des résultats. La racine T48, qui a pour caractéristiques spectrales un pic de polarisation de 12 mrad à 0,1 Hz, est enfouie dans un milieu qui à cette fréquence (0,1 Hz) se charge de façon optimale uniquement de 5 mrad. La polarisation totale résultante, correspondant à la somme des effets de la racine et du sol, est plus faible et se décale vers les fréquences hautes, ce qui est clairement induit par le sol. Parfois pour certains échantillons, les effets de polarisation pour une masse racinaire enfouie sont du même ordre de grandeur que ceux du sol. En comparaison avec l'étude de [Schleifer et al. \(2002\)](#), il est tout à fait raisonnable d'obtenir des effets de polarisation confondus. L'échantillon est analysé dans la direction transverse, correspondant au plan d'anisotropie pour lequel la polarisation est la plus faible. De plus, une quantité de sol importante est intégrée. Ces deux conditions reflètent néanmoins la réalité de certains systèmes racinaires sur un terrain (direction et profondeur) et dictent donc notre faculté à les détecter.

De même, la comparaison entre les signaux issus de l'analyse PPS et PPT montrent une certaine cohérence venant renforcer le crédit que l'on peut accorder à ces résultats. A ce stade de l'étude, les deux méthodes semblent bien adaptées pour mettre en évidence les effets de polarisation des systèmes racinaires in-situ. L'information apportée par la PPS est plus riche pour la discrimination, surtout si nous considérons uniquement à l'étude de la courbe de décroissance et l'inversion des données en paramétrant la fonction de Cole-Cole.

Limites observées

Il est important de noter qu'il se produit potentiellement des effets cumulatifs. Ce phénomène est visible lorsque la décroissance n'atteint pas zéro car du courant reste emmagasiné dans le milieu. Ceci a pour conséquence d'augmenter le taux de décroissance de la chargeabilité. Cet effet est néanmoins identique quel que soit l'échantillon analysé lorsque la durée d'injection est fixe. Les temps d'injection longs sont logiquement moins soumis à cet effet. Même si les résultats obtenus pour une durée d'injection de $T_{ON}=2$ s, montrent des différences d'amplitude de chargeabilité globale plus importantes, la présence d'effets cumulatifs induit une incertitude plus grande sur le résultat. Cette remarque est aussi à prendre en compte pour les mesures intrinsèques présentées précédemment. En mode "Full wave", il aurait été possible d'es-

timer les effets de ces cumuls, ceci étant une perspective envisagée afin d’approfondir cette étude.

Bien que la qualité des décroissances soit moins bonne pour l’expérience sur le porte échantillon, des essais de modélisation ont été menés avec la même procédure que pour les mesures directes sur les échantillons. Les écarts au modèle étaient plus importants, ce qui peut se justifier à la fois par la moins bonne qualité des décroissances du potentiel mais cela peut aussi refléter un modèle non adapté. En effet, la mesure sur le porte échantillon intègre à la fois les effets de polarisation de la racine et ceux du sol. L’utilisation d’électrodes impolarisables permet de s’affranchir des effets liés à la polarisation d’électrode indésirable.

6.2.b Cartographie in-situ

i Présentation de l’arbre de la placette expérimentale

Approximativement un an après la plantation, les essais sont conduits sur la placette expérimentale in-situ n°3 sur laquelle est implantée un arbre approximativement de 2,5 m de hauteur et 15 cm de diamètre au collet, avec un système racinaire composés de racines superficielles (ou traçantes à l’opposé de pivotantes). Les relevés effectués au moment de la plantation (mars 2013) montrent principalement deux racines primaires de 20 et 25 mm de diamètre à environ 10 et 15 cm¹ de profondeur (profondeur du toit de la racine) se propageant dans la direction longitudinale à la placette. La photographie (figure 6.10a) fait difficilement apparaître qu’en réalité, au départ du tronc, les racines se situent pratiquement sur la même abscisse X et sont disposées l’une au dessus de l’autre. Ce n’est qu’en s’éloignant du tronc que celles-ci se séparent.

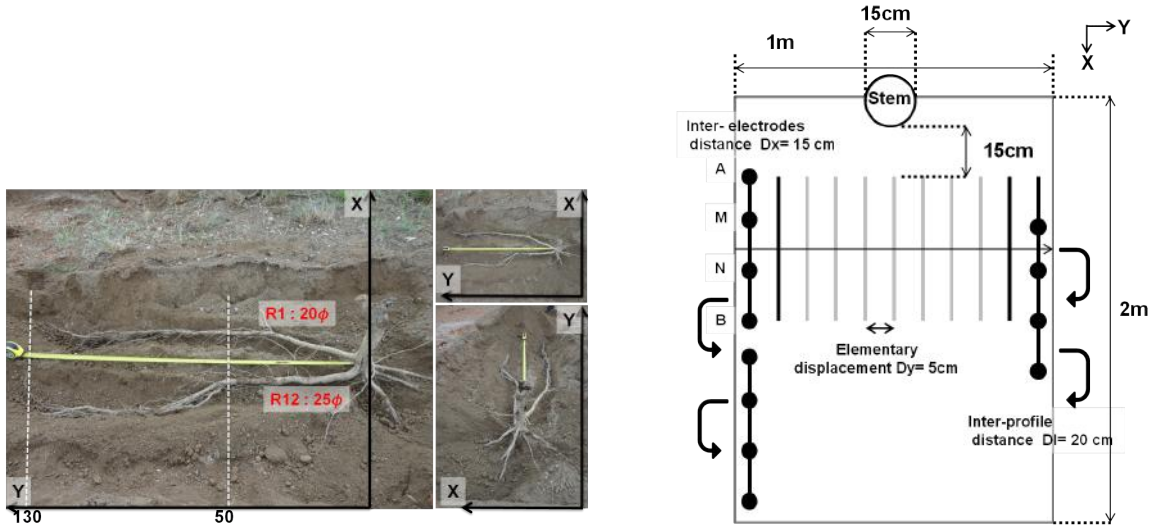
ii Protocole d’acquisition

Les premières mesures sont réalisées en janvier 2015. La disposition des électrodes et le maillage des mesures tient compte de l’information a priori dont nous disposons sur la position initiale des racines en supposant que leurs profondeurs et leurs directions n’aient pas trop évolué. Pour cela nous utilisons la méthode de cartographie à distance inter-électrodes (a) constante, par un dispositif de type Wenner α avec $a = 15$ cm. D’après la relation empirique proposée par [Edwards and Hillel \(1977\)](#) et pour cette distance inter-électrodes, la profondeur effective (profondeur à laquelle la portion de terrain supérieure possède la même influence sur le signal mesuré que la portion de terrain inférieure) atteignable est évaluée à 10,5 cm. Cette valeur est empirique est peut varier en particulier avec la résistivité du terrain. Les électrodes (clous de 9 cm en acier inoxydables) sont fixées sur un support en bois afin de maintenir un écartement constant et pour qu’elles soient toutes enfoncées à la même profondeur sur toute leur longueur. En tenant compte de cet enfoncement, nous considérons que la racine est bien atteignable par les lignes de champs électriques créées avec ce dispositif. Dans ces conditions de teneur

Les études de [Dahlin et al. \(2013\)](#) et ([Hördt et al., 2007](#)) montrent que in-situ, l’utilisation d’électrodes impolarisables n’est pas meilleure lorsque : (i) le terrain d’étude possède une résistivité électrique faible ; (ii) les électrodes ayant servi d’injection ne soient pas immédiatement utilisées pour la mesure suivante du potentiel. Sur ce site d’étude, la première condition est respectée car le sol est limoneux et possède une résistivité faible (de l’ordre de $45 \Omega \text{ m}$). La seconde condition est entièrement vérifiée, le dispositif formé d’un quadripôle fixe avec deux électrodes d’injection et deux servant uniquement pour la mesure du potentiel. Dans ce cas, nous avons considérés que l’amplitude des effets de polarisation d’électrode sur le signal total mesuré est certainement faible.

1. Ces valeurs sont mesurées à 80 cm du tronc

D'après la figure 6.10b, trois profils longs de 1 m sont effectués dans la direction transverse (X) à la racine (dans la largeur de la placette). Chaque profil est distant de 20 cm (D_l) selon la direction longitudinale (Y) à la placette. Sur chaque profil, les mesures sont réalisées selon un pas D_x de 5 cm, en translatant le quadripôle d'électrodes.



(a) Relevé des positions et des diamètres des racines principales à l'état initial (Mars 2013) au cours de la plantation de l'arbre sur la placette n° 3

(b) Schématisation du protocole d'acquisition montrant le type de dispositif (Wenner α), la direction du quadripôle d'électrodes (direction longitudinale (Y) de la placette = direction supposée de la racine); le déplacement (dans la direction X) élémentaire du quadripôle et les positions des trois profils par rapport à la position du tronc

FIGURE 6.10 – Présentation de la placette expérimentale d'étude et du protocole d'acquisition pour l'étude *in-situ*

Cette grille d'acquisition a aussi été choisie afin d'obtenir un bon compromis entre la résolution et le temps d'acquisition. La résolution spatiale, dictée par la distance (D_x) entre chaque point de mesure, permet de différencier des anomalies distantes au minimum de 5 cm. Chaque mesure est répétée pour chaque fréquence au minimum vingt fois, ou moins lorsque les différences entre deux mesures successives sont inférieures en amplitude à 0.1% (sur le module). Ceci a permis d'effectuer la cartographie en un peu moins de trois heures.

Dans un premier temps, une cartographie est réalisée sur une placette similaire (en dimension et constitution), mais sur laquelle aucun arbre n'est planté. Cet essai est réalisé dans des conditions d'expérimentations identiques : la mesure sur la placette avec l'arbre effectuée le jour suivant et aucune précipitation ni variation de température n'est relevée. Les paramètres expérimentaux ainsi que le dispositif expérimental sont inchangés.

iii Résultats

Les résultats sont présentés sous forme de cartographie en deux dimensions correspondant à des valeurs de résistivité et de phase apparentes pour une couche située à 15 cm environ soit la profondeur moyenne estimée de la racine.

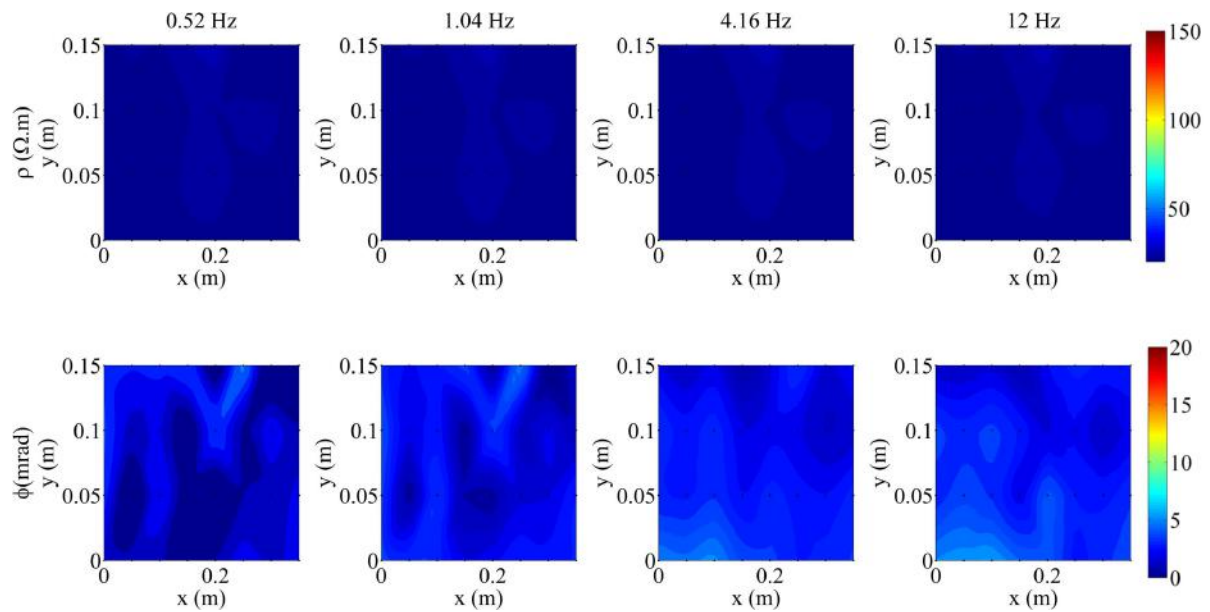


FIGURE 6.11 – Résultat de la cartographie de polarisation provoquée spectrale effectuée à l'aide du LIPPMAN sur la placette de référence ; en haut : module de la résistivité en $\Omega.m$, En bas : phase en mrad

Les échelles de couleurs ont été fixées de façon à ce qu'elles soient identiques sur les deux placettes d'études afin de faciliter leur comparaison. Le module de la résistivité (ρ) est relativement faible étant contenue entre 30 et 45 $\Omega.m$, ce qui correspond bien à la résistivité d'un matériau de type limoneux. Nous ne distinguons pas de tendance, le sol semble être bien homogène sur l'ensemble de la section. De même, sur la phase (Φ), les variations observées ne semblent pas indiquer de direction privilégiée. Remarquons cependant qu'à basses fréquences (pour 0.52 et 1,04 Hz), ces variations semblent être corrélées avec ρ . Avec l'augmentation de la fréquence, l'ensemble de la placette se charge plus pour atteindre un maximum à $\simeq 5$ mrad.

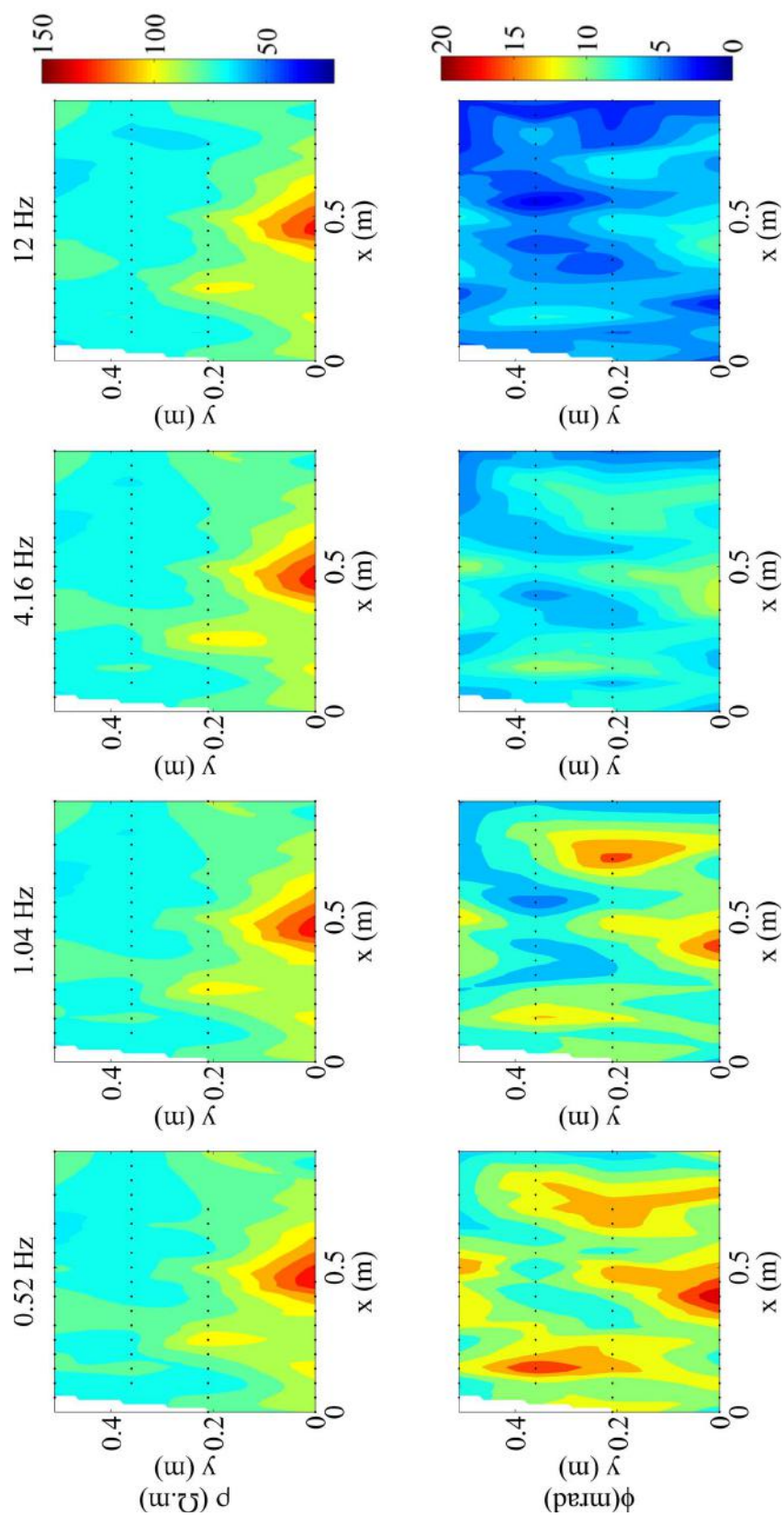


FIGURE 6.12 – Résultat de la cartographie de polarisation provoquée spectrale effectuée à l'aide du LIPPMANN sur la placette 1 ; en haut : module de la résistivité en $\Omega \cdot m$, En bas : phase en mrad

D'après la figure 6.12, il existe clairement une corrélation entre le module de la résistivité, la phase et la position théorique des deux racines principales. Ces deux racines semblent créer une anomalie pour ρ égale à $150 \Omega \text{ m}$ ($+100 \Omega \text{ m}$ par rapport au sol encaissant) et positive sur Φ en moyenne de 15 mrad ($+10 \text{ mrad}$ par rapport au sol encaissant). L'anomalie témoignant de la présence probable de masse racinaire semble apparaître bien plus clairement à basses fréquences, avec une amplitude de 10 mrad à 1 Hz , alors qu'elle n'est que de 6 mrad à 25 Hz (du même ordre de grandeur que l'amplitude maximale observée sur la placette de référence). Ceci est la manifestation des effets de polarisation du sol constaté sur la placette de référence. La position de l'anomalie centrée sur la placette ($X=0,5 \text{ m}$) et l'étendue ($\pm 20 \text{ cm}$) correspond bien à la position et au diamètre des deux racines identifiées. Cette anomalie s'étend suivant la direction longitudinale (Y). Nous ne différencions pas bien les deux racines en s'éloignant du tronc, en particulier sur ρ . Les anomalies identifiées ne sont pas des mesures aberrantes puisqu'elles sont constituées de plusieurs points de mesures avec une continuité entre chaque.

iv Discussion

Dans notre expérience la proportion de racine par rapport à la tranche de sol intégrée est au minimum de 13% (en considérant le diamètre relevé à la date de la plantation), vraisemblablement plutôt de l'ordre de 25% en supposant que la racine est doublée en diamètre (à la date de l'expérience). Ce pourcentage est indicatif car il est déterminé uniquement en considérant le rapport entre l'épaisseur de la couche de sol au dessus de la racine avec le diamètre de la racine. La racine est intégrée plus ou moins dans sa direction radiale, puisque le quadripôle de mesure est orienté dans une direction proche de celle de la racine. Cette configuration est favorable pour faire apparaître le maximum d'effets de polarisation. Plus la distance au tronc est grande, moins l'anomalie est visible. Ceci peut s'expliquer car les racines diminuent en diamètre en s'éloignant du tronc et se ramifient. De plus, la racine plonge légèrement et la profondeur d'investigation dans ce cas est trop faible pour la mettre en évidence. D'autre part, la quantité de sol intégrée est plus grande et les effets sont donc plus contrôlés par la réponse du sol que par ceux de la racine.

6.2.c Conclusion sur l'influence de la fréquence d'injection et de la masse racinaire sur le potentiel de détection

Quelques difficultés méthodologique et instrumentale ont été rencontrées au cours de ces expériences. Sur des racines sèches, aucun signal n'était transmis (même à l'aide d'une unité de puissance permettant l'application de fort voltage). Ce constat montre l'importance de la teneur en eau de la racine sur le signal transmis et, par conséquent, montre que la résistivité des racines est une quantité physique cohérente afin de les discriminer du sol. De plus il était important de bien définir les gammes d'incertitudes car des biais sont induits par la méthodologie adoptée pour l'étude avec le porte échantillon. Lorsque nous changeons d'échantillon, les propriétés mécaniques du milieu tels que la compaction et la fissuration sont affectées. L'étude de Okay (2011) montre la sensibilité des mesures de polarisation à ces derniers ; l'évolution de la référence reste relativement faible (\leq à 1 mrad à 1 Hz et \leq à $0,5 \text{ mV/V}$).

Au total 15 échantillons sont étudiés, ce qui nous permet d'en déduire une certaine tendance. Cette étude nous a permis d'avancer quelques éléments de réponses aux objectifs préalablement définis à savoir :

- la mise en évidence d'effets de polarisation à basses fréquences. Ces effets ont pu être visibles à l'aide d'une méthodologie simple, rapide et non destructive à l'aide d'électrodes impolarisables de type ECG. Les résultats sont cohérents avec la littérature existante

et montrent que, dans les conditions de l'expérience, la racine se charge plus et à des fréquences plus basses que le sol (limoneux) ;

- la mise en évidence de l'augmentation des effets de polarisation en domaine temporel avec l'augmentation de la masse de l'échantillon de racine enfouie. L'influence du diamètre et par conséquent de la proportion de racine intégrée par rapport au sol est clairement significative sur le résultat des mesures de conductivité complexe. En deçà d'une certaine dimension (approximativement $\leq 10\%$), nous avons logiquement observé que la racine n'est pas prédominante sur le signal total résultant. Ceci permet de définir la résolution maximale à laquelle on peut prétendre détecter en terme de proportion racine/sol ;
- les résultats obtenus en laboratoire et in-situ concordent car dans la gamme de fréquence du LIPPMANN (soit de 0.025 à 25 Hz) les effets de polarisation du sol, deviennent de plus en plus prépondérant sur la réponse globale lorsque la fréquence d'injection augmente, et viennent cacher l'information sur la présence de racines. De plus, d'après les mesures de laboratoire et in-situ, l'amplitude de la polarisation du sol ne dépassent pas 5 mrad, dans les conditions de compaction, teneur en eau et composition du sol de nos expériences alors que celle de la racine atteint jusqu'à 15 mrad ;
- les deux approches PPS et PPT semblent chacune montrer leur efficacité en vue de la détection de système racinaire in-situ. Étant donné que le spectre de phase et en particulier la fréquence du pic de polarisation varie suivant de nombreux paramètres (l'espèce, le type de sol, la teneur en eau du sol, de la racine,...), il semble préférable d'utiliser la méthode PPS in-situ afin d'extraire des cartographies à plusieurs fréquences. Cependant dans des conditions expérimentales bien identifiées, le choix d'une durée d'injection peut être fait afin d'utiliser la méthode PPT, plus aisée à mettre en place in-situ.

Limites observées et travaux en cours

Au cours de cette étude nous disposions d'échantillons limités, qui plus est, possédant une grande diversité d'espèces, d'états de teneur en eau et de décomposition. Les biais expérimentaux étaient importants, ce qui rendait difficile la mise en évidence de petites variations, en particulier pour l'approche PPT moins précise. Des travaux en cours ou en perspectives sont à prévoir afin de mieux comprendre le sens des variations spectrales en fonction de certains paramètres tels que :

- l'influence des propriétés physique et biologique des racines en particulier de leur état de décomposition. Afin de comprendre l'influence de ces paramètres, nous avons testé la mesure sur des échantillons à différents temps de décomposition. Les fréquences du pic spectral varient mais il n'est pas possible à ce stade de déterminer le sens de cette variation en fonction de la décomposition ;
- la teneur en eau de la racine peut varier suivant la saison (variation des flux de sèves), les ressources nutritives (i.e le milieu environnant), sa composition. Ce constat en fait une variable d'intérêt puisque la mesure PP est sensible à ces variations. La comparaison avec les autres études (Tableau 6.3) montre que les différences observées peuvent potentiellement être attribuées à ces facteurs.

6.3 Suivi géoélectrique de l'évolution temporelle en fonction de la teneur en eau du sol

6.3.a Introduction

Le principal objectif de cette recherche est de déterminer si la méthode de polarisation provoquée (PP) apporte une information supplémentaire utile pour l'identification de l'anomalie racinaire dans un sol. Par principe, à la fois le sol et les matériaux organiques tels que les racines se polarisent mais cette réponse est différente suivant les conditions de sol (compaction, type...) et particulièrement de teneur en eau. L'étude de ce dernier paramètre semble pouvoir être intéressant, particulièrement lorsque l'on se place du point de vue des phénomènes biologiques tels que l'absorption d'eau agissant à l'interface racine/sol pour l'identification et la cartographie des anomalies racinaires.

La méthode est évaluée uniquement pour sa capacité à détecter de grosses racines ligneuses, répondant de manière satisfaisante à la problématique de cette thèse, puisque ce sont a priori celles qui initient le phénomène d'érosion dans les digues. Un seul type de sol a fait l'objet de l'étude, un sol majoritairement limoneux et contenant une fraction d'argile non négligeable.

Les dispositifs d'acquisition mis en place pour les expériences menées en laboratoire et in-situ, présentés dans une première partie descriptive (cf. section 6.3.b) permettent de répondre à des objectifs sous-jacents. Ainsi en laboratoire, les essais sont pensés afin d'évaluer les conditions les plus favorables, en termes de fréquence d'injection et de teneur en eau, pour obtenir la meilleure discrimination de la racine du sol. L'expérience in-situ vient en appui aux mesures de laboratoire et permet d'évaluer si nous pouvons tirer profit des variations naturelles. Les résultats sont présentés et discutés en même temps. La conclusion permet de résumer et synthétiser les résultats à la fois de laboratoire et in-situ.

6.3.b Matériel et méthodes

i Expérience en laboratoire

Acquisition des données

Au cours des expériences de laboratoire, la réponse de polarisation provoquée spectrale (PPS) est étudiée à différents niveaux de teneur en eau. Au cours des essais, la température est maintenue à 23.5° et l'humidité de l'air à approximativement 38%.

La méthodologie est inspirée des études de [Florsch et al. \(2011\)](#) et [Zanetti et al. \(2011b\)](#). Les mesures sont réalisées à la surface de cuves en PVC. La cuve de contrôle (A) (longueur 37 cm, hauteur 28 cm) est remplie seulement avec 20 cm de sol, tandis que dans une cuve similaire (B), un échantillon racinaire (diamètre 4 cm, longueur 20 cm) est enterrée à 6 cm de profondeur (figure 6.13).

Un échantillon de racine de peuplier (*Populus alba*) fraîchement collecté sur le terrain, est utilisé au cours de cette expérience. Avant la mesure, l'échantillon était stocké dans une chambre noire et fraîche dans un sac en plastique. Ces conditions permettent de préserver son humidité et sa masse fraîche.

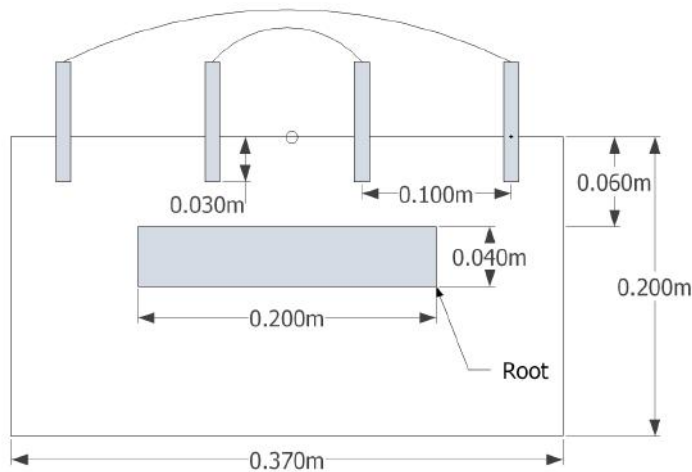
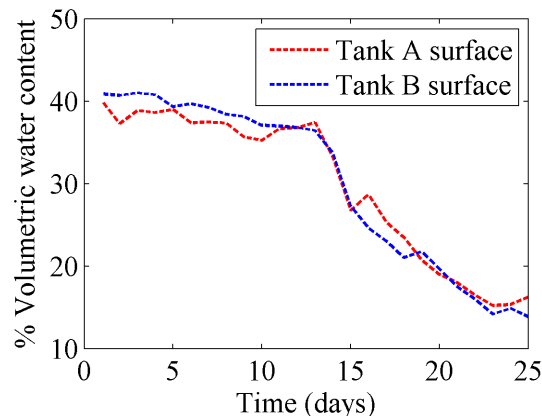


FIGURE 6.13 – Schéma du dispositif de laboratoire. Une racine cylindrique est enterrée dans une cuve remplie avec un sol majoritairement limoneux. Des électrodes en acier inoxydable pour l'injection et la mesure de potentiel sont placées à la surface de la cuve selon un dispositif de type Wenner α .

Contrôle de l'évolution de la teneur en eau

Afin d'évaluer l'influence des différents niveaux de teneur en eau (θ) et de la racine sur la mesure PPS, nous avons dans un premier temps saturé le sol jusqu'à ce qu'une fine couche d'eau soit visible en surface. Cette étape permet de travailler dans des conditions initiales à la fois de compaction et de teneur en eau identiques dans les deux cuves. A l'aide d'une sonde TDR (Time Domain Reflectometry, avec un WET-2- Sensor DeltaT Devices) la valeur θ , à la surface du sol est relevée avant chaque mesure. Les mesures sont répétées chaque jour afin d'étudier l'évolution du signal en fonction de la décroissance de la teneur en eau du sol. Les mesures de surface sont moyennées spatialement et répétées afin de contrôler précisément l'homogénéité des variations temporelles de θ dans les deux cuves. Afin de donner une valeur absolue de la teneur en eau, les sondes TDR doivent être calibrées pour ce type de sol. Dans ce cas, nous nous sommes seulement intéressés aux variations relatives de θ entre les deux cuves avec le temps (figure 6.14). Une calibration précise n'était pas nécessaire.

FIGURE 6.14 – Tendance de la diminution temporelle de la teneur en eau au cours de l'expérience de laboratoire : dans la cuve contenant le sol seul (A, rouge) mais aussi dans la cuve contenant l'échantillon de racine (B, bleue)



La décroissance observée de Θ au cours du temps peut être attribuée seulement à l'assèchement par évaporation. D'après la figure 6.14, cette tendance est quasi-similaire pour les deux cuves. Cela permet de considérer que les mesures électriques sont réalisées dans des conditions identiques de teneur en eau et que seule la racine affecte le signal mesuré.

ii Expérience in-situ sur une placette expérimentale

Les mesures ont été conduites en été (le 6 Aout). Une station météorologique est disponible à proximité (200 m) et apporte des informations sur les précipitations et la température précédant l'expérimentation.

La placette expérimentale choisie (n°1, présentée dans le chapitre 4) a été préalablement décaissée sur 1 m de profondeur puis remblayée de façon homogène avec un matériau fin majoritairement limoneux. Ceci permet de faire l'hypothèse simplificatrice que l'anomalie potentiellement mesurée est due à la présence d'une racine et non au changement de la constitution du sol. Cette hypothèse doit être pondérée par le fait que la placette n'est pas forcément homogène en compaction, en particulier à proximité des zones racinaires.

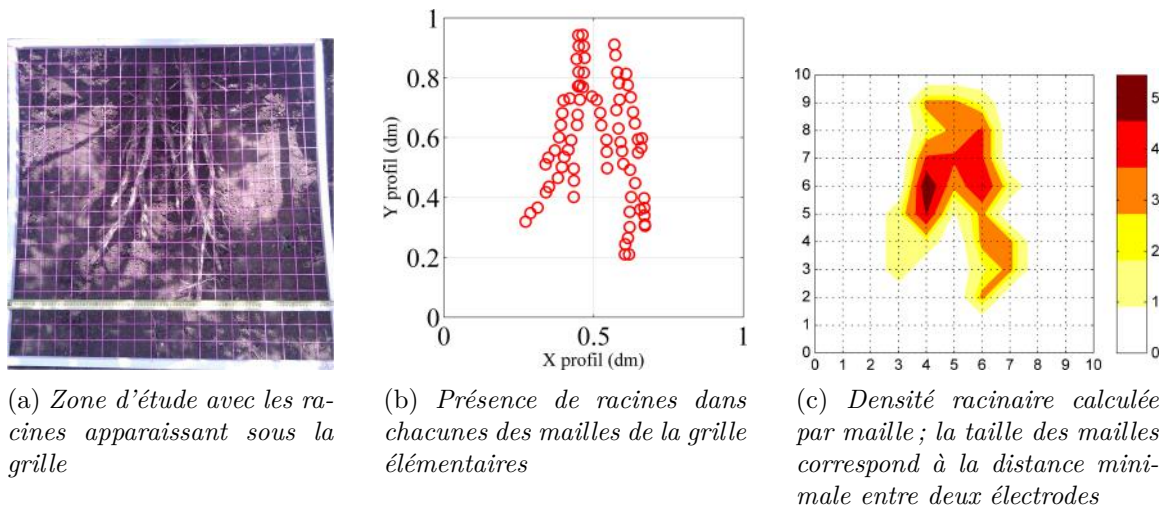


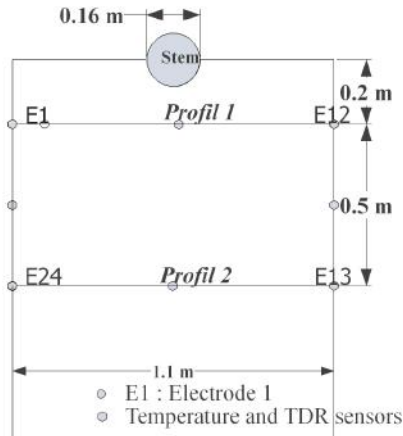
FIGURE 6.15 – Présentation des différentes étapes menant à l'évaluation de la distribution racinaire dans le sol de la placette d'étude (n°1)

Un an après la plantation, un peuplier de 320 cm de haut, avec un système racinaire composé de grosses racines superficielles et traçantes est sélectionné pour cette étude. Une procédure d'identification des racines principales permet de reconstruire la densité racinaire du sol à partir de photographies. Dans un premier temps, les racines sont extraites avec précaution en retirant la couche de sol les entourant (figure 6.15a). Les racines sont progressivement enterrées à nouveau avec le même sol et en posant une grille (de dimension 1 m x 1 m) décrivant un maillage (de maille élémentaire 5 cm x 5 cm). Une photographie est effectuée pour les trois profondeurs respectivement de $z = -35, -10$ et -5 cm. Ces trois images sont analysées à l'aide d'un programme sous Matlab® qui consiste à cliquer dans chaque maille lorsque une racine est identifiée afin de reconstruire le tracé des différentes racines pour les trois profondeurs (figure 6.15b). Une grille de 10 cm est choisie pour la carte de densité finale (figure 6.15c), correspondant à la distance minimale entre les électrodes, en assemblant les mailles de 5 cm deux à deux. La mesure PPS est positionnée rigoureusement sur la même grille.

Acquisition des données

En considérant la distribution racinaire visible à partir de la figure 6.15, les mesures de polarisation provoquée temporelle (PPT) sont réalisées selon deux profils perpendiculaires à la direction des racines principales. Sur chaque profil, les mesures sont menées avec douze électrodes espacées de 10 cm. Selon Dahlin et al. (2002), pour un terrain de type limoneux peu résistant, il est possible d'utiliser des électrodes en acier inoxydable sans dégrader la qualité des mesures de

chargeabilité. Cet espacement est choisi afin d'obtenir une profondeur d'investigation suffisante et une résolution horizontale adaptée à la position des racines dans le sol.



(a) Position des deux profils composés de douze électrodes et position des capteurs de température et de teneur en eau (o)



(b) (1) Terrameter SAS 4000; (2) Sonde Watermark pour la mesure de Θ ; (3) Electrodes en laitons implantées sur 10 cm de profondeur; (4) Maillage carré de dimension 1 m x 1 m; (5) Arbre d'étude, Peuplier de 16 cm de diamètre au collet

FIGURE 6.16 – Schématisation et photographie de la stratégie d'acquisition des données lors de l'expérience menée in-situ

Les profils sont implémentés dans le Terrameter SAS 4000 (ABEM instruments) programmé avec une séquence de mesure sur quatre canaux. Le nombre de répétitions du cycle d'injection pour chaque quadripôle dépend de la variabilité des données mais est au moins de deux. La durée du courant d'injection est fixée à 3 s pour toutes les expériences, approximativement trois fois plus longue que la constante de temps caractéristique (1 Hz en fréquence). Le potentiel est intégré sur six intervalles de temps. Le temps total d'intégration est fixé à 3200 ms et couvre la décroissance du potentiel lorsque le courant transmis est coupé. Le premier intervalle commence après 10 ms, et correspond au retard initial. Enfin, les mesures PPT sont réalisées dans une configuration d'électrodes de type Wenner-Schlumberger.

Cartographie et surveillance de l'absorption d'eau par les racines : stratégie d'acquisition

Simultanément sur le même dispositif, l'évolution de la réponse PPT est suivie dans le temps. En réalisant ce monitoring de la placette, il est possible de s'intéresser aux processus biologiques ayant lieu à l'interface entre les racines et le sol tel que le phénomène d'absorption d'eau et pour mieux localiser les racines.

La répétabilité des mesures est estimée dans un premier temps afin de déterminer un niveau de confiance sur la variabilité observée, relativement à la précision de l'instrument. Le suivi a commencé le 05 Aout 2014 à la suite d'un événement pluvieux et a duré trois jours. Durant les deux semaines précédentes, il n'y avait pas eu de précipitation sur le site et la température moyenne pendant la journée était de 25°C. Les arbres n'ont pas été arrosés et étaient, par conséquent et volontairement, placés dans des conditions de fort stress-hydrique au début de l'expérience. Afin de mesurer la teneur en eau volumétrique moyenne à la surface du sol, des sondes TDR ont été placées à chaque extrémité et au milieu de chaque profils (figure 6.16). Les

données ont été collectées trois fois par jour.

Lorsque les mesures sont effectuées sur un arbre in-situ, les variations journalières de la teneur en eau et de la réponse PP sont observées et dépendent principalement de la température et de la physiologie de l'arbre pour lesquels les flux de sèves sont de bons indicateurs (Burgess et al., 2000; Čermák et al., 2008). Selon Boaga et al. (2013) et Doussan et al. (2006), des variations hebdomadaires en lien avec la dynamique d'absorption d'eau par les racines des arbres sont attendues. Nous avons étudié ces changements spatiaux et temporels d'humidité des sols selon les méthodes proposées par Garré et al. (2011) et Werban et al. (2008). La température a été mesurée tous les jours en même temps que les mesures PP (9h00 A.M).

iii Interprétation des données

In situ, le travail est mené sur un dispositif expérimental en conditions contrôlées, avec un milieu supposé homogène en termes de propriétés physique et chimique du sol et sur l'ensemble de la zone d'étude. Par conséquent, seule la présence de la racine enterrée produit une anomalie du signal électrique. Cette hypothèse est néanmoins à modérer car d'autres facteurs peuvent intervenir tels que de probables décompaction du milieu à proximité immédiates des zones racinaires.

Pour l'expérience de terrain, l'interprétation de nos résultats est robuste grâce à la localisation précise des racines, en analysant les données après le creusement du sol. En dernier lieu, l'amplitude de l'anomalie de résistivité mesurée peut être comparée avec les valeurs de résistivité des zones racinaires provenant de la littérature (en se reportant au chapitre d'état de l'Art). Pour les profils de tomographie, les données sont interprétées après inversion avec le logiciel Res2Dinv®. Avant inversion, toutes les courbes de décroissance pour lesquelles des valeurs sont incohérentes (essentiellement les chargeabilités négatives ne présentant pas de continuité avec les points voisins) sont supprimées. La résistivité et la chargeabilité sont inversées simultanément. Les paramètres d'inversion sont fixés en tenant compte que les tomographies produisent peu de points et que les distances inter-électrodes sont petites. Pour cela, un maillage permettant que le nombre de nœuds dépassent le nombre de points, est choisi. Les effets des parois (side blocks) sont réduits. Toutes les inversions présentaient une erreur quadratique moyenne RMS inférieure à 5%.

6.3.c Résultats et discussions

i Expérience de laboratoire : teneur en eau et discrimination

Pour un espacement inter-électrodes de a égal à 10 cm, des différences significatives sont visibles sur la mesure de la résistivité complexe entre la cuve de sol seul et la cuve contenant la racine. D'après la figure 6.17, les parties réelle σ' et imaginaire σ'' de la conductivité sont affectées par les variations de teneur en eau du sol (Θ). En exprimant la résistivité complexe par son amplitude et sa phase, l'amplitude de la résistivité augmente de 34 à 110 Ωm lorsque la teneur en eau Θ diminue de 40% à 18%. Lors de l'assèchement du sol, la tendance est globalement identique entre les deux cuves. Dans la cuve sans racine, les deux parties diminuent rapidement pour les valeurs de teneur en eau les plus grandes ($\Theta = 45\text{-}32\%$), puis moins rapidement pour les teneurs en eau intermédiaires ($\Theta = 32\text{-}20\%$) et finalement plus rapidement à nouveau lorsque la teneur en eau devient inférieure à 20%. Sur la partie réelle, la différence entre les deux cuves était significative à deux niveaux de teneur en eau ($\Theta = 18\text{-}22\%$ et $30\text{-}35\%$) avec respectivement de plus basses et plus hautes valeurs pour la cuve contenant la racine. Pour la partie imaginaire, la différence était seulement significative pour des teneurs en eau en deçà de 17%.

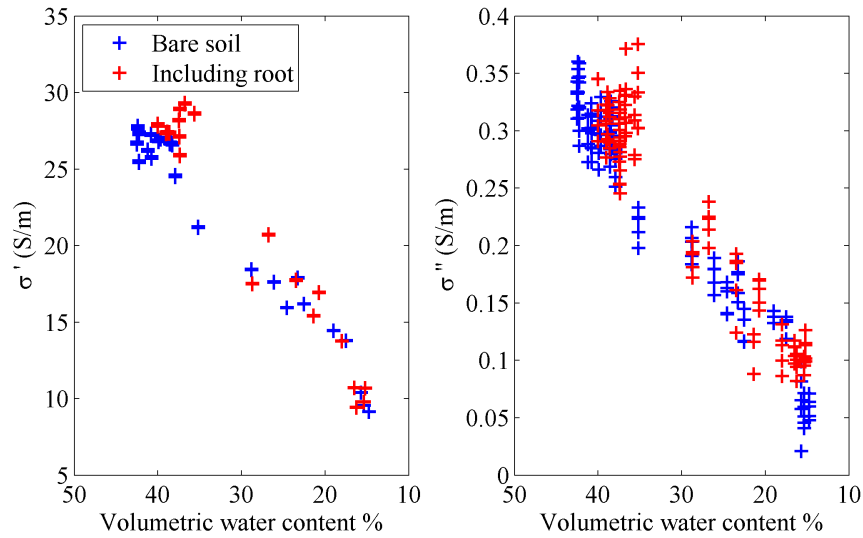


FIGURE 6.17 – Evolution de la partie réelle (σ') et de la partie imaginaire (σ'') avec la décroissance de la teneur en eau. Les croix rouges représentent les mesures dans la cuve contenant la racine, les croix bleues dans le sol seul. Toutes les fréquences de 0,26 Hz à 25 Hz sont représentées sur σ''

Aucune différence entre les deux cuves n'a pu être observée lorsque nous considérons un espacement entre électrodes de 5 cm (maximum de différences pour la résistivité et la phase : $\Delta\rho = 7\Omega\text{m}$ et $\Delta\phi = 0,21\text{ mrad}$ respectivement). Dans ce cas, la densité de courant à la profondeur des racines semble être trop faible pour observer une réponse significative. Ce constat confirme l'idée que les variations observées avec 10 cm d'espacement inter-électrodes peuvent être induites par la racine. Le maximum de différences avec ce dispositif est observé autour de 3,8 mrad (à $\Theta = 18\%$ et à 1,04 Hz), ce qui est relativement faible comparé aux variations de l'amplitude de la résistivité, mais significatif en terme de résolution.

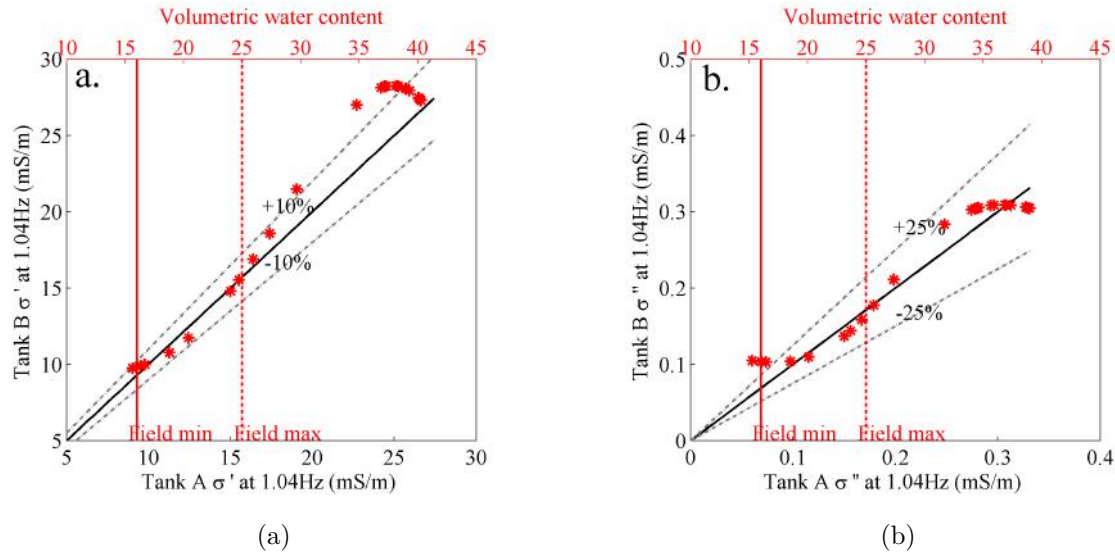
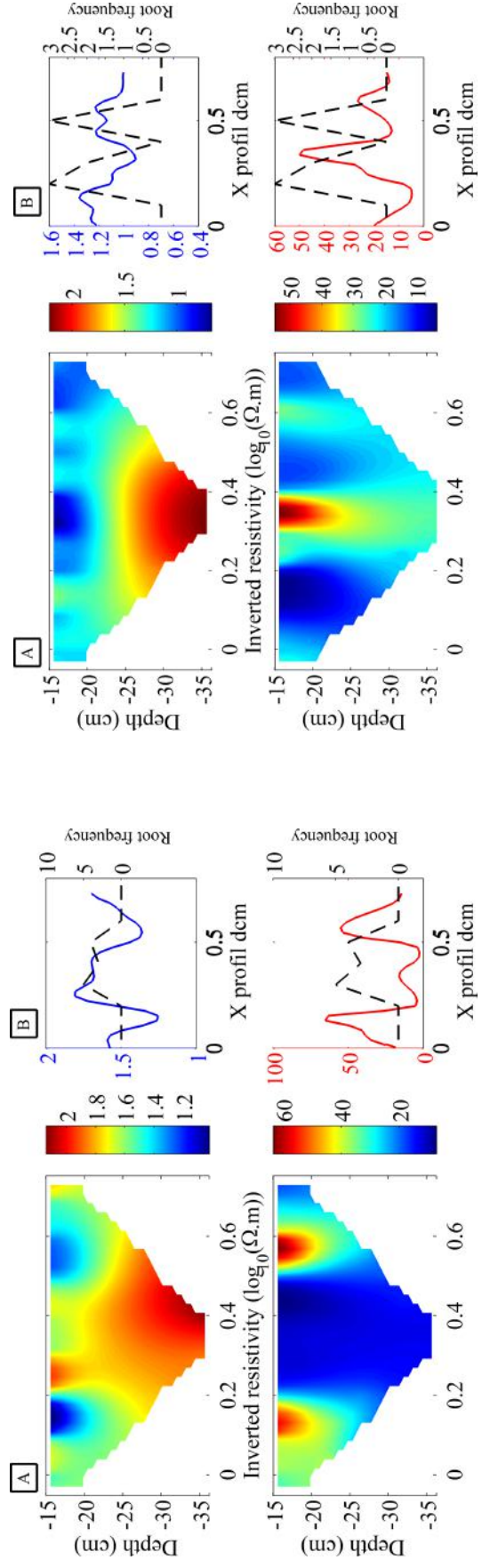


FIGURE 6.18 – Comparaison entre la cuve A (sol seul) et B (incluant une racine) pour la partie réelle σ' (figure 6.18a) et imaginaire σ'' (figure 6.18b) de la conductivité au cours de l’assèchement du milieu. L’évolution de la teneur en eau Θ est représentée sur un troisième axe en haut de chaque graphique. La ligne pleine représente la position pour laquelle les valeurs sont identiques entre les deux cuves. Les lignes pointillées représentent les limites significatives entre les cuves. Les lignes verticales montrent les limites de la gamme de teneur en eau observée lors de l’expérience *in-situ*

L’expérience menée en laboratoire montre qu’une racine enterrée induit des variations sur la mesure de résistivité complexe. La tendance de la partie réelle de la conductivité obtenue est en accord avec la loi d’Archie (intégrant l’argile) et la littérature existante (Ghorbani et al., 2009). Pour la partie imaginaire de la conductivité, il y a clairement une compétition entre les mécanismes provoqués par les racines et le sol contrôlée par la teneur en eau du sol. Pour des sols peu humides ($\Theta=10-20\%$), σ'' apparaît être significativement plus grand pour la racine que pour le sol, même si très faiblement. La teneur en eau de la racine a pu varier plus lentement que l’humidité du sol au cours de la phase d’assèchement, facilitant les effets de polarisation (Martin, 2012). Le maximum du rapport de conductivité entre les mesures avec et sans échantillon de racines enterré, pour σ'' à 1,04 Hz est autour de 1.7. Ceci est en accord avec les résultats obtenus par Zanetti et al. (2011b) : une augmentation moyenne proche de 1.7 de la partie imaginaire de la conductivité en présence d’échantillon racinaire enterré a été observée par rapport à la mesure sur un sol seul. Finalement, les effets de polarisation de la racine ont pu être observés à basses fréquences avec un maximum à 1,04 Hz, ce qui semble pertinent et approprié pour les instruments de polarisation provoquée temporelle (PPT) sur le terrain.

ii Cartographie de la variabilité spatiale in-situ

Une bonne corrélation est obtenue pour chaque section entre la densité racinaire et respectivement une forte anomalie positive de résistivité et une anomalie de chargeabilité négative (figure 6.19a). Des artefacts, certainement dus aux processus d’inversion, apparaissent aux frontières des sections de tomographie. La chargeabilité totale M_T est fortement et inversement corrélée avec la résistivité ρ . La figure 6.19b montre, pour un profil extrait à 25 cm de profondeur correspondant au maximum de densité racinaire, un bon calage entre le profil des racines et ρ mais aussi M_T .



(a) Section n°1

(b) Section n°2

FIGURE 6.19 – Sections ρ et M_T obtenues le premier jour (le 6 Aout) avec 25% de teneur en eau (Ωm) (échelle \log) et de M_T (ms) pour les deux profils situés à A1 - 20 cm et A2 - 70 cm du tronc. 6.19B : Superposition de la fréquence racinaire (ligne pointillée) et respectivement les profils d'amplitude de la résistivité ρ et de chargeabilité M_T extraits à 25 cm de profondeur (Lignes bleues continues : Amplitude de la résistivité ρ - En rouge : Amplitude de la chargeabilité totale M_T)

La résolution spatiale de la méthode est suffisante pour montrer deux pics en résistivité et chargeabilité, correspondant à deux départs principaux des racines proches l'une de l'autre. Elle montre que les racines divergent progressivement avec la distance au tronc (figure 3).

iii Cartographie par surveillance de l'absorption d'eau par les racines : évolution temporelle

Répétabilité de la mesure

La méthode proposée par Gazoty et al. (2013) est utilisée afin de tester la fiabilité en terme de variabilité des mesures. Une seconde série de mesures a été obtenue deux heures après la première série qui correspond au début de l'expérience. L'intervalle de confiance est placé à 5% pour la résistivité et 7% pour la chargeabilité (figure 6.20). Dans ces conditions 95% des valeurs des différences relatives entre les deux séries sont contenues dans ces intervalles. Un troisième jeu de mesure, quatre heures après le début de la première acquisition a montré de plus larges et nombreuses variations, ce qui pourrait indiquer un effet dû à l'activité biologique.

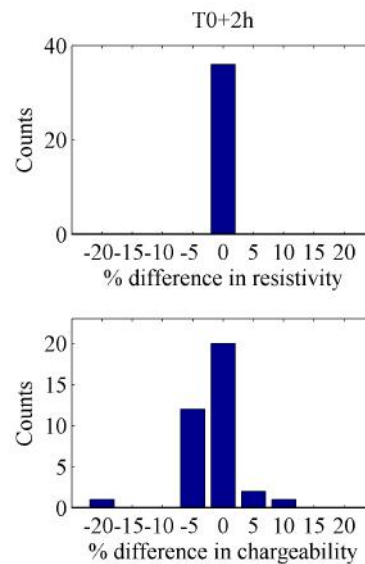


FIGURE 6.20 – Histogrammes montrant le pourcentage de différences entre la mesure au temps initial (T_0), pour toutes les mesures de valeurs apparentes du profil n°1 de l'amplitude de la résistivité ρ (en haut), et de la chargeabilité totale M_T avec les valeurs à $T_0 + 2h$

Variations temporelles

La résistivité n'a montré que des variations positives pendant l'expérience de suivi. A l'inverse, les variations de chargeabilité sont principalement négatives, avec quelques exceptions (14% des points ont un changement relatif de +20%).

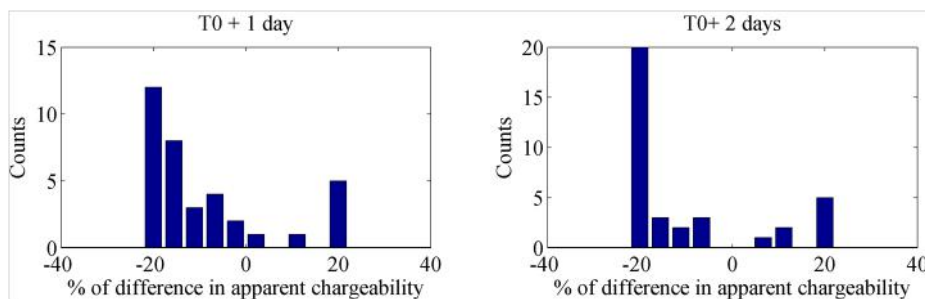


FIGURE 6.21

Des différences spatio-temporelles sont apparues entre les sections au temps initial (06 aout) et respectivement un et deux jours après (figure 6.22). Dès le premier jour à la suite d'une

décroissance d'environ 6% de Θ en surface, les sections tomographiques révèlent deux directions opposées correspondant aux réponses du sol et des racines : (i) une diminution d'environ 5 ms de la chargeabilité totale (M_T) dans la zone de sol, et (ii) une légère augmentation de M_T à proximité des racines. Une tendance identique est observée les jours suivants avec cependant moins d'intensité.

L'excavation et la cartographie du système racinaire, et la comparaison avec les valeurs mesurées permettent d'interpréter les anomalies avec une bonne précision spatiale. De plus, les variations de ρ et M_T au cours de l'expérience de suivi sont significatives car elles sont plus élevées que les intervalles de confiance déterminés. L'amplitude de la résistivité est plus simple à mesurer par rapport à la chargeabilité, car provenant d'un phénomène de faible amplitude avec un rapport signal/bruit faible. La chargeabilité est le résultat de la combinaison des effets des racines et du sol à une certaine fréquence. Cependant les racines sont encaissées dans le sol et représentent seulement une petite proportion du volume totale de sol.

Le premier jour du suivi ($\Theta = 25\%$), les racines apparaissent logiquement comme des anomalies positives de résistivité. Un sol limoneux et une forte densité de racines situées à faible profondeur sont des conditions idéales pour la détection de l'anomalie de résistivité. Pourtant, dans ces conditions de mesures, cette même zone de concentration de racines apparaît, de façon inattendue, comme une anomalie négative de chargeabilité.

La forte anomalie de résistivité au temps initial est la conséquence de deux paramètres principaux : une forte densité racinaire d'une part, et une plus faible teneur en eau que partout ailleurs sur le profil d'autre part. Cela laisse suggérer que, au temps initial, la section ne semblait pas être homogène en teneur en eau du fait de l'absorption de l'eau par les racines, accentuée par les conditions de stress hydrique appliquées à l'arbre précédent l'expérience.

Ce constat semble pouvoir en partie expliquer que, même si on s'attend à ce que la masse racinaire augmente la chargeabilité, la teneur en eau initialement plus faible dans cette zone agit de façon prépondérante sur la réponse de chargeabilité en l'abaissant. De plus, étant donné que le sol a été décompacté, lorsqu'il est retiré autour des racines pour les cartographier (figure 6.22), la placette n'était pas non plus, à l'état initial, dans des conditions homogènes de compaction. Une compaction plus faible autour des racines peut induire une réponse de polarisation moins importante dans cette zone, la compaction d'un sol agissant directement sur l'espace poral (Schleifer et al., 2002). A cause de la plus grande compaction et des flux d'eau de l'extérieur (sol naturel plus dense et plus argileux) vers l'intérieur de la placette, la diminution de la teneur en eau est probablement plus lente sur les bords, ce qui est en accord avec la réponse PP obtenue. Enfin, en comparaison avec l'expérience de laboratoire, les mesures de systèmes racinaires dans leur ensemble intègre aussi la contribution de petites racines sur la réponse de polarisation (Kemna et al., 2000) ce dont nos relevés de terrain ne tiennent pas compte.

Toutes les études issues de notre recherche bibliographique traitent de la dépendance des échantillons racinaires à l'aide d'instruments de mesures PPS. A l'inverse au cours de l'expérience de terrain, nous avons étudié la réponse de polarisation dans le domaine temporel (PPT). Les paramètres d'acquisition et particulièrement le choix de la durée de l'injection (Time ON = 3s) semblent essentiels afin de limiter la superposition des réponses du sol et des racines. Cependant, la transition de la fréquence vers le domaine temporel est complexe et ce choix (Time ON = 3s) n'est probablement pas optimal pour l'excitation des racines. Par conséquent nous aurions obtenu une autre carte de chargeabilité en changeant la durée d'injection.

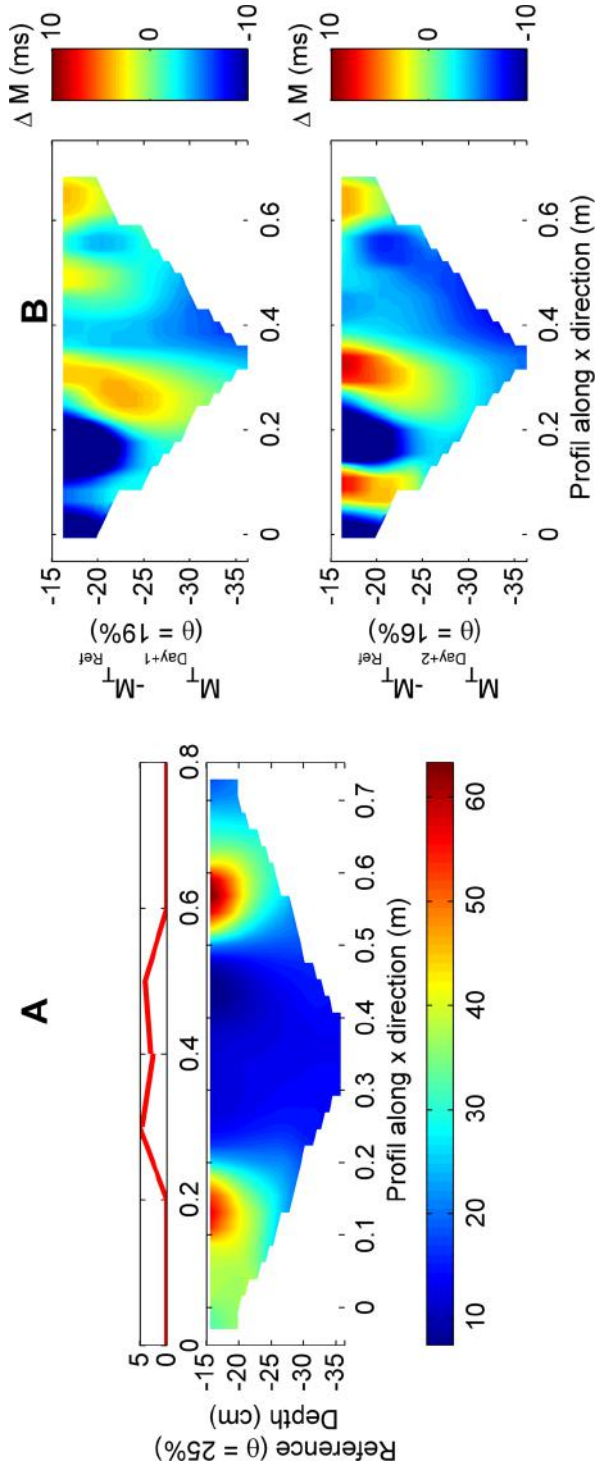


FIGURE 6.22 – Sections de chargeabilité totale inversées; 6.22.a : référence (06 Aout) du premier profil montrant aussi la fréquence racinaire à 25 cm de profondeur (au dessus); 6.22.b : différences relatives entre le jour $i+1$ et i

Les variations de teneur en eau sont étudiées ici comme un paramètre qui peut fournir une information utile sur la localisation des zones racinaires sous l'hypothèse qu'il se produit une dynamique spéciale de Θ à proximité des racines à cause de l'absorption d'eau. Avec l'assèchement du sol, la section de chargeabilité tend de plus en plus à ressembler à la section de résistivité. D'autres variations perturbant l'interprétation sur le terrain peuvent être attribuées à d'autres sources que les variations de Θ , soit par évaporation à la surface du sol, soit par infiltration d'eau par gravité et capillarité.

6.3.d Conclusion et perspectives

Cette étude propose d'ajouter la physique de la polarisation au concept de la résistivité classique afin de cartographier les systèmes racinaires dans le sol. La capacité à détecter les racines en incluant les effets de polarisation semble être intimement liée à la densité racinaire et à la teneur en eau, chacune influençant l'amplitude de la polarisation. L'expérience de laboratoire a montré une légère anomalie de la résistivité complexe en présence d'un échantillon de racine enterré, principalement à faibles teneurs en eau.

L'expérience de terrain a démontré, de manière inattendue, que la résistivité et la chargeabilité à basses fréquences étaient inversement corrélées pour de fortes teneurs en eau, même si la densité de masse racinaire était grande, suggérant un effet prépondérant de l'état hydrique par rapport à la présence de la racine.

L'évolution de la teneur en eau du sol liée à l'absorption par les racines a apporté des informations utiles pour les localiser. Cependant, la résolution de la méthode nécessite d'être améliorée pour cartographier les racines précisément. En conclusion, il apparaît que la polarisation des racines augmente la chargeabilité totale dans un sol limono-argileux sec. Des recherches complémentaires sont nécessaires pour une meilleure compréhension de la dépendance en fréquence. L'étude en polarisation provoquée spectrale (PPS) ou bien en PPT, mais à différents temps d'injection, permettrait potentiellement de pallier les limites identifiées en obtenant et comparant les tomographies à différentes fréquences et en particulier à très basses fréquences ($\pm 0,25$ Hz).

6.4 Conclusions, limites et perspectives

Nous formulons ici les conclusions des études menées en laboratoire et en conditions semi-contrôlées pour l'approche électrique. Tout au long de ces essais, la motivation de notre étude était d'ajouter la physique de la polarisation au concept de résistivité classique afin d'améliorer l'interprétation des cartographies des systèmes racinaires.

Réflexions sur l'extension de la résistivité à la polarisation provoquée (PP)

La faisabilité de la méthode de polarisation provoquée passe nécessairement par une étape de calibration en laboratoire. Les paramètres intrinsèques de la racine et du sol influencent la mesure de PP. Il est nécessaire de quantifier le poids (l'amplitude) et la direction (la fréquence) de chacun d'entre eux avant de pouvoir comprendre la réponse globale de la racine dans un sol.

A l'aide d'un dispositif simplifié, les essais ont été menés en PPS et ont plus ou moins permis de retrouver les résultats connus de la littérature. En complément et pour combler un manque de la littérature existante, ces échantillons ont aussi été analysés en PPT. Les résultats simulés à la suite d'inversion par le modèle de Cole-Cole montrent des valeurs en adéquation avec les mesures en PPS. Au cours de la même étude, en faisant varier la masse d'échantillons enterrés, nous avons pu mettre en évidence que les contrastes racine/sol étaient de faibles amplitudes et, qu'en deçà d'une certaine proportion de masse racinaire par rapport à celle du sol, les effets du sol prédominaient.

A ce stade, les deux approches montrent un potentiel pour leur mise en place in-situ. Cependant, les résultats obtenus avec la méthode de PPS sont plus riches car l'ensemble du spectre est directement accessible et plus robuste, la répétabilité étant meilleure.

Mise en pratique et difficultés rencontrées

Les résultats obtenus en laboratoire ne doivent pas être transposés directement in-situ sans prendre en compte le fait qu'en réalité les racines sont en interaction avec leur environnement. Une racine principale porte des racines plus fines. Ces racines fines (que l'on nomme aussi radicelles ou chevelu racinaire) sont le siège d'interactions sol/racine et jouent aussi un rôle dans la polarisation observée. Cependant nous observons, sur un dispositif de sol en conditions contrôlées une assez bonne cohérence avec les résultats obtenus sur des échantillons racinaires et en conditions semi-contrôlées, pour l'identification de racines ligneuses primaires et superficielles.

Une étude a été menée autour de la question de l'état de teneur en eau du sol. L'information de la résistivité ρ et la phase Φ en fonction de la teneur en eau du sol semble indiquer qu'il est préférable de travailler en conditions sèches de sol (en régime statique). Des images haute résolution à différents temps sont obtenues et montrent une corrélation entre la position des racines et les anomalies de résistivité complexe. La sensibilité de la PP à l'évolution de la teneur en eau liée à l'activité d'absorption des réseaux racinaires semble apporter une information utile pour leur identification.

Perspectives

Des essais en prospection PPT in situ en conditions contrôlées ont été menés récemment. Le travail d'interprétation permettra de valider les essais de laboratoire et de définir quelle est la méthode la plus efficace à mettre en place in-situ.

A ce stade de l'étude, l'information apportée par la physique de la polarisation semble pertinente pour localiser les racines dans le sol. La combinaison des tomographies électrique et acoustique sol/tronc peut être maintenant testée en conditions réelles sur une digue.

**Application et valorisation :
expérimentations en conditions
réelles**

CHAPITRE 7

Application aux digues d'Arles

Sommaire

7.1	Introduction	162
7.1.a	Objectifs	162
7.1.b	Plan de l'étude	163
7.2	Présentation des sites d'études	163
7.2.a	Site 1 : rive gauche du Petit Rhône - Mas Beaumont	164
7.2.b	Site 2 : rive droite du Grand Rhône - Beaujeu	167
7.3	Matériel et méthode	168
7.3.a	Instrumentation	168
7.3.b	Stratégie de prospection	170
7.3.c	Préparation in-situ	174
7.4	Traitement et interprétation des données	175
7.4.a	Méthode électrique	175
7.4.b	Méthode acoustique	176
7.5	Résultats et discussions	178
7.5.a	Petit Rhône rive gauche	178
7.5.b	Grand Rhône rive droite	199
7.6	Conclusions et limites de l'application des méthodes de tomographies aux digues	203

7.1 Introduction

Les méthodes géophysiques apportent potentiellement une connaissance sur le type de sol dans lequel la végétation est implantée ainsi que sur la masse et la structure des systèmes racinaires (traçant, pivotant, ...). Ces deux informations sont nécessaires afin d'évaluer la possibilité d'initiation et la poursuite de mécanismes de dégradations de l'ouvrage par des érosions provoquées par la présence de végétation arborée. Les méthodes retenues pour la détection de racines en conditions réelles sont la tomographie de résistivité complexe, qui inclut l'ERT (tomographie de résistivité) et la PP (polarisation provoquée), et la tomographie acoustique.

7.1.a Objectifs

Cette étude s'inscrit dans la continuité de travaux menés en laboratoire et sur un dispositif expérimental, respectivement en milieu contrôlé et semi-contrôlé. Le premier objectif est d'étudier la faisabilité des méthodes effectuées en conditions contrôlées sur un cas concret de terrain et ainsi d'identifier les limites actuelles de notre approche.

Le second objectif est d'apporter un appui à l'évaluation d'experts. Les données obtenues par prospection géophysique permettent d'enrichir la connaissance sur le "critère d'état végétation" ainsi que le "critère d'état remblai" décrits par les indicateurs suivants formulés par [Bambara et al. \(2014\)](#) :

-
- les indicateurs de **végétation** sont la densité d'individus, le volume racinaire par individu, la structure racinaire des individus et le degré de décomposition des individus (étude de souche) ;
 - les indicateurs de **perméabilité intrinsèque du remblai** sont eux décrits par l'estimation de la perméabilité du matériau du remblai ou de la fondation, la granulométrie ainsi que le compactage du remblai.

Le modèle d'évaluation de la vulnérabilité d'un ouvrage vis-à-vis de la végétation associée prend en compte, parmi d'autres critères, le positionnement de l'arbre sur la digue. Lorsque l'arbre est situé à l'aval, il peut par exemple se développer au pied, sur le talus ou sur le couronnement. Dans notre étude nous nous restreindrons au cadre d'arbres isolés implantés sur un ouvrage de constitution à priori homogène et nous étudierons différentes situations types pour lesquelles le positionnement de l'arbre varie (site 1 : arbre en pied de digue sur une risberme, site 2 : arbre sur la crête et le talus amont).

Le premier cas d'étude sera discuté sur la base des critères d'états décrits précédemment.

7.1.b Plan de l'étude

Dans un premier temps (cf. section 7.2), pour les deux sites d'études retenus nous avons réalisé une étude préalable consistant à recueillir le plus d'informations possibles en particulier concernant l'historique de la digue, ses caractéristiques techniques, le système dans lequel elle s'intègre et son environnement. Dans une seconde partie (cf. section 7.3), nous énoncerons la stratégie et les moyens méthodologiques adoptés afin de mettre en évidence les anomalies racinaires en conditions réelles. La conclusion (cf. section 7.6) portera sur la faisabilité d'exporter les méthodes effectuées en conditions contrôlées sur un cas concret in-situ et permettra ainsi d'identifier les limites actuelles de notre approche.

7.2 Présentation des sites d'études

Nous avons choisi pour cette étude un système d'endiguement de protection contre les inondations fluviales situé à l'ouest de la région Provence Alpes Côte d'Azur, en basse vallée du Rhône. La Camargue notamment, du fait de sa topographie plane et peu élevée est particulièrement vulnérable à l'aléa inondation. Des crues importantes ont lieu régulièrement et la présence d'une population riveraine, rurale et urbaine, aggrave le risque. On recense dans le passé des événements significatifs ayant conduit à des dégâts financiers et humains tels que la crue de 1856 ou, plus récemment, celle de 2003 (figure 7.2).

Les deux sites d'étude choisis sont des ouvrages hydrauliques protégeant la ville d'Arles et ses alentours. Ils sont situés respectivement en rive gauche du Petit-Rhône et en rive droite du Grand-Rhône (figure 7.1). Le premier site d'étude est situé à proximité d'un paléochenal (non daté) et de brèches consécutives aux crues de 2002 et 2003 (figure 7.2). Ces ouvrages hydrauliques sont construits en remblai et datent du *XIX^e* siècle. Sur ces ouvrages une végétation arborée de densité variable multiplie potentiellement le risque d'érosion interne.

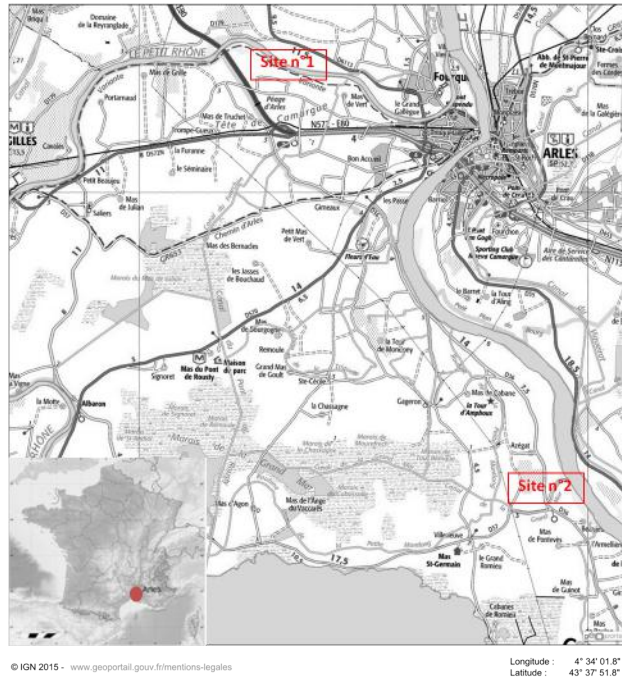


FIGURE 7.1 – Localisation des deux sites d'étude sur un plan large ; site 1 : situé en rive gauche du petit Rhône ; site 2 : situé en rive droite du Grand Rhône.

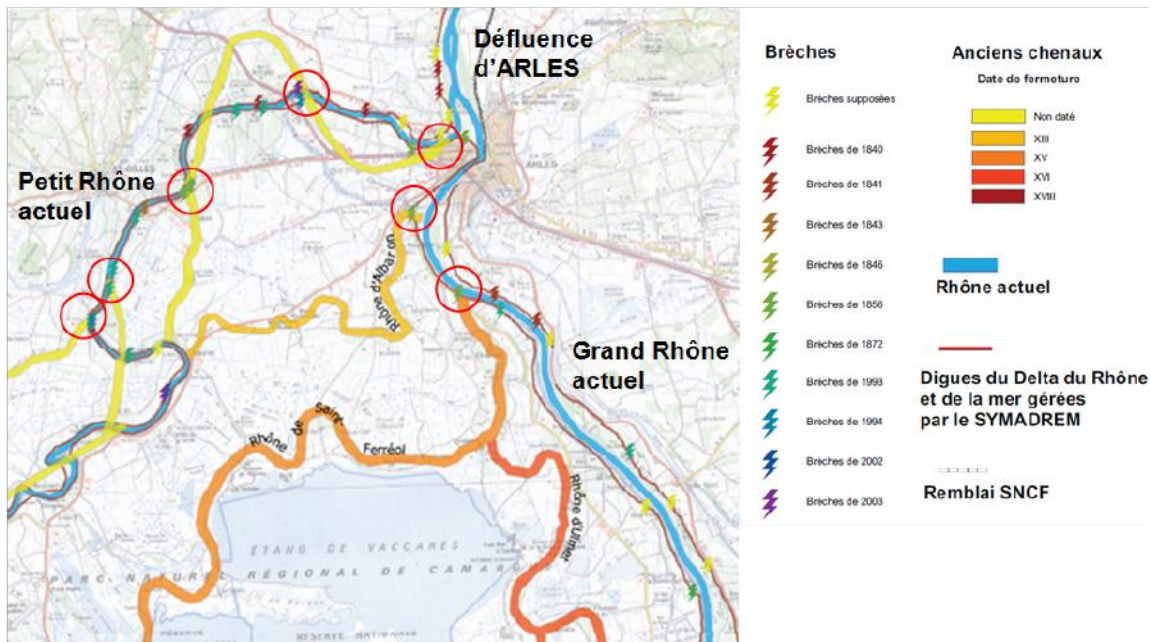


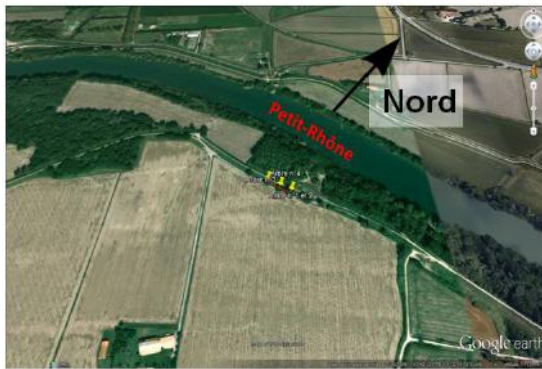
FIGURE 7.2 – Contexte historique et reconstitution des paléochenaux du Petit et Grand Rhône d'après les archives du SYMADREM

7.2.a Site 1 : rive gauche du Petit Rhône - Mas Beaumont

Le premier site d'étude retenu est celui du Mas Beaumont (coordonnées GPS : 43° 42'13.27"N, 4° 32'39.71"E) où une digue en remblai est située en rive gauche du Petit-Rhône.

i Recherche documentaire

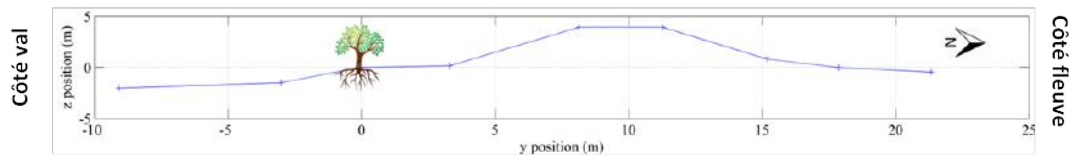
A partir de l'image satellite (figure 7.3a), on observe le positionnement d'arbres, de forte densité côté fleuve implantés sur le segonnal, isolés côté aval. Ce sont les arbres isolés côté aval sur lesquels porte notre étude. Ces arbres sont situés au pied de la digue sur une risberme.



(a) Emplacement du site sur photo aérienne



(b) Position des arbres en pied de digues



(c) Profil topographique de la digue du Mas Beaumont du Petit-Rhône Rive gauche (site 1) d'après levé effectué sur place

FIGURE 7.3 – Présentation du site d'étude n°1, Mas Beaumont

D'après les archives, cette digue n'a pas fait l'objet de travaux autre que la crête rendue carrossable par rechargement d'environ 50 cm de matériaux de type laitiers au printemps 1994 (suite à la crue du 08/01/1994, figure 7.2). La crête de digue s'élève à 4 m de hauteur par rapport au niveau de la fondation. D'après le sondage géotechnique présenté sur la figure 7.4 situé à proximité (200 m à l'ouest), la fondation et le corps de digue sont de nature argileuse (argile à argile silteuse), excepté sur les deux premiers mètres où l'on trouve une couche plutôt sableuse. Nous considérerons que les arbres se situant sur la risberme sont implantés dans un matériau argileux-limoneux. Si leurs profondeurs d'enracinement dépasse 3 m alors les racines seront dans un matériaux plutôt sableux (d'après le sondage effectué en crête de digue).

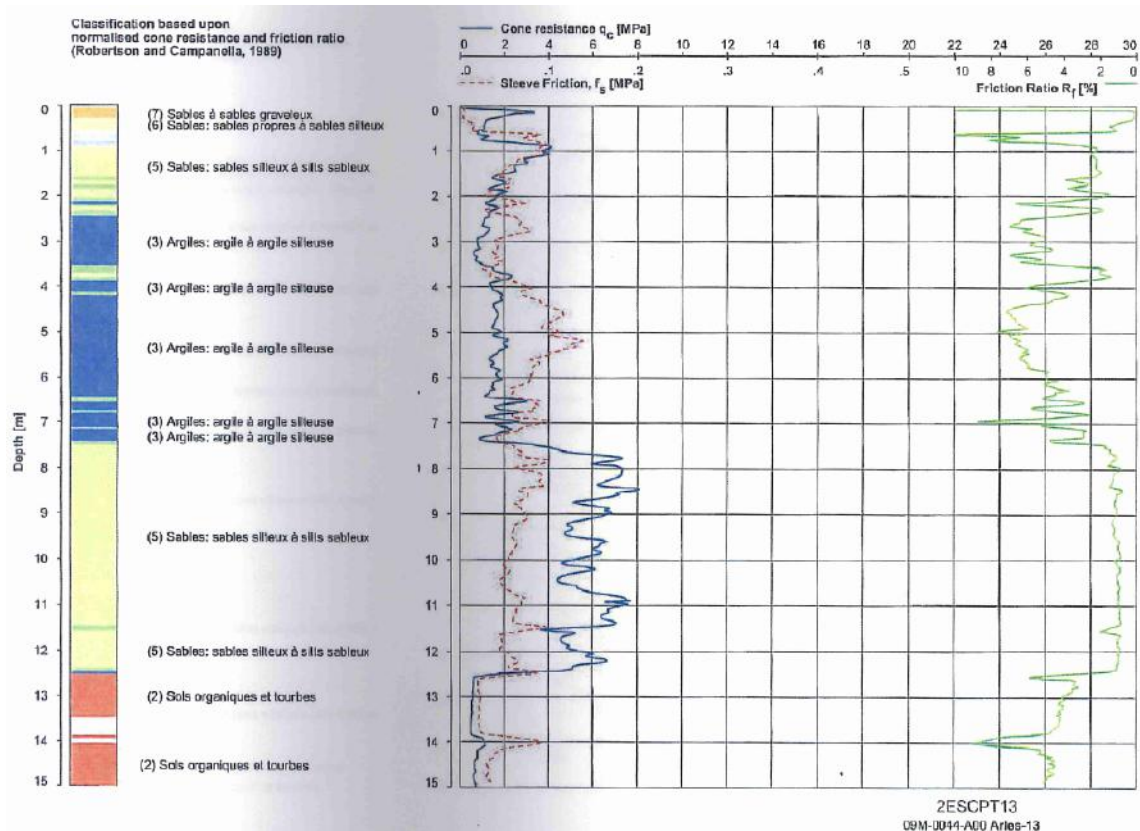


FIGURE 7.4 – Sondage géotechnique situé à proximité du site d'étude (approximativement 200 m) d'après les archives du SYMADREM

ii Observations visuelles

Visuellement, a priori, aucune hétérogénéité de type conduites d'évacuation, poteaux ou encore ligne électrique n'est présente. Quelques gravats de laitiers utilisés lors de la reconstruction de la digue devenue carrossable ont glissés le long du parement. De plus, une forte couche d'humus d'environ 40 cm s'est formée au contrebas (dans la pente côté aval) de chaque arbre.



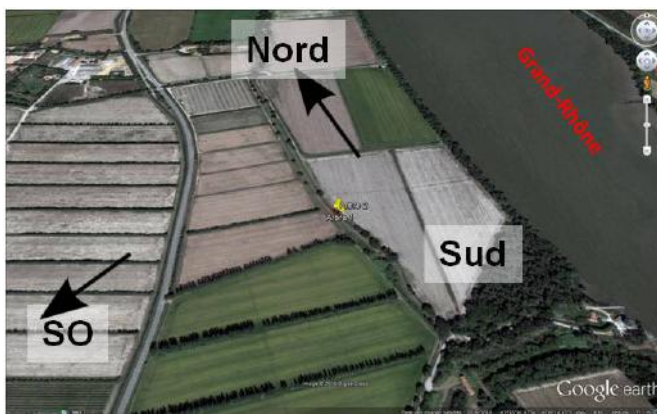
FIGURE 7.5 – Observations visuelles à proximité du chêne (n°2) choisi pour l'étude; flèches rouges : départs probables de racine primaire superficielles; hachures blanches : zone de concentration d'humus (dépôt de feuilles en décomposition)

Les arbres situés au pied de la digue sur une risberme sont des chênes de grandes dimensions. La dimension du chêne d'étude n°2 est d'environ 7 m de hauteur et de diamètre 75 cm au collet (40 cm et 65 cm diamètre au collet pour l'arbre 1 et 3) .

La géométrie des systèmes racinaires peut être appréhendée de façon sommaire et sur les principes à l'aide des travaux de [Zanetti et al. \(2015\)](#), du guide de gestion de la végétation des digues ([Venetier et al., 2015b](#)) et de l'observation de la partie aérienne : sur l'arbre n°2 (figure 7.5), un départ de grosses racines primaires (symbolisées par les flèches rouges) est visible à la base du tronc. L'arbre bénéficie de ressources facilement atteignables côté aval (champ labouré recevant de l'engrais, bon sol, nappe proche), ce qui permet de supposer un développement dans cette direction de grosses racines. Par ailleurs, la présence d'une nappe peu profonde doit conduire au développement de racines verticales cherchant l'eau plus en profondeur. L'arbre est situé à la limite de la pente et subit des vents du Nord venant de l'amont (coté fleuve) : il est donc susceptible de développer des racines de type "haubans" dans cette direction. Quant au substrat limoneux, il induit souvent le développement d'un système racinaire fasciculé produisant des racines de taille limitée dans toutes les directions et tous les angles par rapport à la surface. Il est sujet à un géotropisme léger qui privilégiera à nouveau un développement côté aval.

7.2.b Site 2 : rive droite du Grand Rhône - Beaujeu

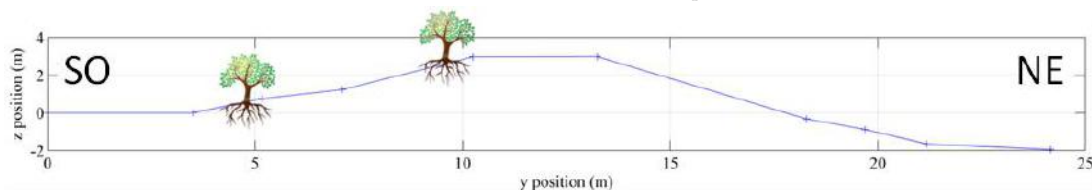
Le second site d'étude retenu est celui de Beaujeu (Coordonnées GPS : 43°35'30.07"N, 4°39'14.45"E) où une digue en remblai est située en rive droite du Grand-Rhône.



(a) Emplacement du site sur photo aérienne



(b) Position des arbres implantés en pied et haut de talus



(c) Profil topographique d'après levé effectué sur place

FIGURE 7.6 – Présentation du site de la digue Beaujeu du Petit-Rhône Rive gauche (site n°2)

D'après les archives, cette digue n'a pas fait l'objet de travaux autre que la crête rendue carrossable par rechargement de matériaux de type laitiers de haut fourneaux. Elle est vraisemblablement construite de façon homogène avec un matériau fin de type limoneux. A partir de l'image aérienne (figure 7.6a), on observe le positionnement éparés d'arbres, de faible densité aussi bien côté fleuve que côté val (zone protégée). Ce sont les arbres isolés côté fleuve sur les-

quels porte notre étude. Ces arbres sont situés à deux niveaux : le premier à la jonction entre la crête et le parement, le second au pied de la digue sur une petite risberme liée à la présence de l'arbre. Dans le prolongement côté val, aucune végétation n'est présente. Pour cette digue nous ne disposons pas d'autres informations sur le contexte géotechnique et anthropique, même si celle-ci est réputée être homogène de nature argilo-limoneuse.

i Observations visuelles

Les arbres concernés sont relativement jeunes pour des chênes, et vigoureux. En première estimation, les systèmes racinaires devraient être du même type que pour l'arbre du site n°1, avec un développement plus marqué des racines verticales de l'arbre de crête qui doit chercher l'eau à une profondeur relative plus importante.

7.3 Matériel et méthode

Deux méthodes de prospections sont mises en œuvre afin d'imager le sol et d'identifier la présence de racine sur un cas réel. La première méthode appelée prospection géoélectrique s'intéresse aux variations spatiales d'un champ électrique alors que la seconde méthode est sensible à l'impédance acoustique du sol, proportionnelle à la masse volumique et à la vitesse de propagation d'une onde mécanique à travers. Le principe de l'application de ces méthodes sur une digue, reste identique à celui employé en conditions semi-contrôlées.

7.3.a Instrumentation

Le choix du matériel et des réglages instrumentaux doit être défini pour permettre une bonne mesure (pour laquelle le contraste de l'anomalie sera le plus visible) mais aussi pour satisfaire les conditions expérimentales in-situ parfois contraignantes. Dans cette partie, nous explicitons le choix de ces paramètres en faisant le lien avec les résultats obtenus en conditions contrôlées et semi-contrôlées.

i Polarisation provoquée temporelle

Pour les prospections électriques, nous utilisons le Terrameter SAS400. Il permet de mesurer, à la suite d'injection de courant en forme de créneaux alternativement positifs puis négatifs, le potentiel résultant.

Choix de la séquence d'acquisition

Nous choisissons aussi d'utiliser une unique séquence d'acquisition de type Wenner-Schlumberger, car celle-ci présente une sensibilité équivalente aux variations verticales et horizontales. Ce n'est pas forcément la séquence optimale mais c'est un bon compromis lorsque l'on a peu d'informations sur le type de terrain étudié ou la forme des anomalies recherchées.

Choix du temps d'injection et de la mesure de la décroissance

Tout au long de cette étude, les créneaux d'injection sont réglés à 1 s. La décroissance est mesurée lorsque le courant est coupé, pendant 3,2 s en utilisant 6 fenêtres de mesures (réparties de façon logarithmique).

Le temps d'injection est un paramètre fondamental en prospection géoélectrique de polarisation provoquée car il détermine la forme de l'onde injectée et par conséquent la manière avec laquelle le milieu est excité. Les résultats d'études menées en laboratoire (cf. section 6.1) ont montré que, la plupart du temps, l'amplitude de la réponse d'échantillons racinaires était située à basses fréquences, en deçà de 1 Hz. En considérant la relation inverse liant le temps et la fréquence, il semble donc nécessaire d'injecter sur une durée proche de 1 s. En pratique des durées plus élevées conduiraient à des contraintes (1) la nécessité d'avoir des batteries

adaptées (2) l'augmentation du temps d'injection implique une augmentation du temps total de l'acquisition d'un profil.

Le courant est coupé pendant trois fois plus de temps que la durée de l'injection. A nouveau les expériences menées en laboratoire ont confirmé qu'un effet résiduel (décroissance n'atteignant pas zéro) pouvait être observé. Augmenter le temps de coupure permet de s'affranchir au mieux de ces effets cumulatifs.

Choix des électrodes

Pour ces prospections in-situ, nous privilégions l'utilisation d'électrodes polarisables en laiton. Théoriquement, ces électrodes ne sont pas les plus adaptées car elles risquent de se polariser après injection de courant et de créer un signal parasite. Pour diminuer l'influence de la dérive de la polarisation d'électrodes, le protocole mis en place propose de ne pas effectuer de mesure de potentiel sur une électrode qui vient d'injecter. L'étude de [Dahlin et al. \(2002\)](#) a démontré que pour un site les résistances sont modérées, il est possible d'utiliser des électrodes ordinaires (en acier) sans dégrader de façon importante la qualité des mesures de chargeabilité. Or, les digues sont composées de matériau limoneux et le sol au moment de la mesure est humide. Par conséquent, nous sommes dans des conditions de faibles résistivités favorables afin d'éviter la polarisation d'électrode.

ii Tomographie acoustique de tomographie sol/tronc

L'instrument Boviari est particulièrement bien adapté à cette étude car il permet d'enregistrer le signal entier avec une fréquence d'échantillonnage élevée, sur plusieurs voies de réception (ici quatre correspondant aux quatre capteurs situés sur le tronc). De plus, une source de type marteau peut être synchronisée avec les réceptions et ainsi donner le temps de départ initial de l'onde pour ensuite calculer le temps de propagation jusqu'au tronc.

Choix de la source

La masse (ou le marteau) est une source classiquement utilisée en prospection géophysique car elle permet d'exciter le sol sur une large gamme de fréquence. Ce dispositif produit tout type d'ondes mais préférentiellement des ondes P et les ondes de Rayleigh (lorsque l'on vient percuter verticalement avec une masse). Afin d'assurer un bon couplage entre la masse et le sol, une plaque en fer est posée sur le sol.

Choix des capteurs

Nous choisissons lors de cette expérience des transducteurs de contact de type accéléromètres unidirectionnels, c'est-à-dire mesurant l'accélération verticale d'un point. Deux fréquences centrales différentes sont testées, chacune située dans les ultrasons. La fréquence centrale détermine la bande passante, plus ou moins basses fréquences, transmises par le sol et enregistrée sur le tronc.

Les caractéristiques sont les suivantes :

- Capteurs de contact de type accéléromètre
- Fréquence centrale = 20 kHz et 54 kHz (capteurs Sofranel et Boviari)
- Capteurs en réception disposés sur le tronc suivant quatre directions (correspondant aux quatre points cardinaux) réparties à 90°
- Hauteurs des capteurs : [0.9, 0.8, 0.9, 0.8] m par rapport au sol

Les fréquences centrales sont situées à la frontière entre le champ d'application de l'audible et celui de l'ultrasonique. Ce choix est un compromis afin d'obtenir une résolution suffisamment bonne par rapport à la taille de la cible (racine), mais aussi afin de produire le phénomène de guide d'onde par la racine recherchée, et enfin d'éviter une trop forte atténuation géométrique.

7.3.b Stratégie de prospection

L'acquisition se déroule en deux étapes.

Dans un premier temps, un ou plusieurs profils "grossiers" (distance entre capteurs bien supérieure à la taille de l'anomalie recherchée) sont effectués dans les plans longitudinal et transversal afin d'estimer l'homogénéité de la digue. Nous distinguons par conséquent si d'autres anomalies dites de constitution (construction, tuyaux...) peuvent entrer en jeu dans l'interprétation plus fine (sur la géométrie des racines). Ces profils permettent de plus d'estimer l'environnement de croissance de l'arbre.

Dans un second temps, on concentre des profils de plus hautes résolutions sur un arbre isolé. A partir de ces derniers on souhaite déterminer le type de système racinaire (si la masse racinaire se concentre sous l'arbre ou si des grosses racines s'en éloignent) ainsi que les directions des racines principales afin d'évaluer les configurations à risques. Par exemple pour le cas du site d'étude du Mas Beaumont, dans le cas d'un arbre isolé situé en pied de talus, nous exploitons plusieurs profils afin de savoir s'il y a intrusion du système racinaire à travers le corps de digue.

La performance d'une prospection, en termes de gain de temps et d'information, dépend des paramètres d'acquisitions tels que la géométrie de la prospection ou les réglages instrumentaux. Par la suite, nous décrivons la stratégie mise en œuvre afin d'atteindre les objectifs tout en essayant de répondre au mieux aux conditions d'une sollicitation par un gestionnaire de digue.

i Géométrie d'acquisition

Site du Petit Rhône rive gauche – Mas Beaumont

Sur ce tronçon de digue, cinq profils électriques sont réalisés afin de connaître le positionnement des systèmes racinaires. Le 1^{er} profil, long de 64 m, longitudinal à la digue (suivant la direction E-O ou de l'axe x), intègre trois chênes respectivement de 40, 75 et 65 cm de diamètre au collet. La distance inter-électrodes d'un mètre permet de mettre en avant la zone d'influence de chaque arbre avec une résolution d'environ 50 cm (en surface) et une profondeur d'investigation estimée à 10 m environ, celle-ci dépendant de la résistivité du sol (figure 7.13).



FIGURE 7.7 – Arbre sélectionné, chêne avec un diamètre au collet de 75 cm ; superposition des positionnements des profils à la topographie de la digue (site n°1)

Les profils 2, 3, 4 et 5 sont disposés afin de connaître avec une meilleure résolution (les électrodes étant espacées de 20 cm), la géométrie ainsi que l'extension du chêne sélectionné ($x : 10$; $y : 0.5$) dans toutes les directions (figure 7.7). Les profils 3 et 5 permettent ainsi de vérifier que l'extension des racines et la croissance des racines soient vers le corps de digue et/ou à l'opposé vers le val (figure 7.8). Le tableau 7.1 synthétise les paramètres des profils réalisés.

N° du profil	Nb d'électrodes	Δ_x (m)	L_p (m)	Orientation (/digue)	Séquence	$Z_{estimée}$ (m)
1	64	1	64	L ^a	WS ^b	10
2	32	0.2	6.4	L	W	0.5
3	32	0.2	6.4	L	WS	1
4	32	0.2	6.4	T	WS	1
5	32	0.2	6.4	L	WS	1

Tableau 7.1 – Résumé des paramètres des profils réalisés sur le site d'étude du Mas Beaumont

- a. L : longitudinal, T : transversal
 b. WS : Wenner-Schlumberger, W : Wenner α

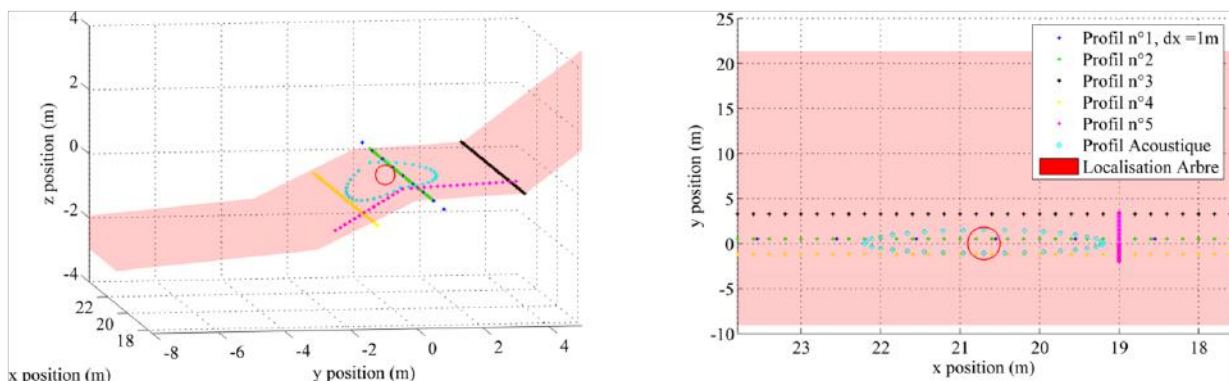


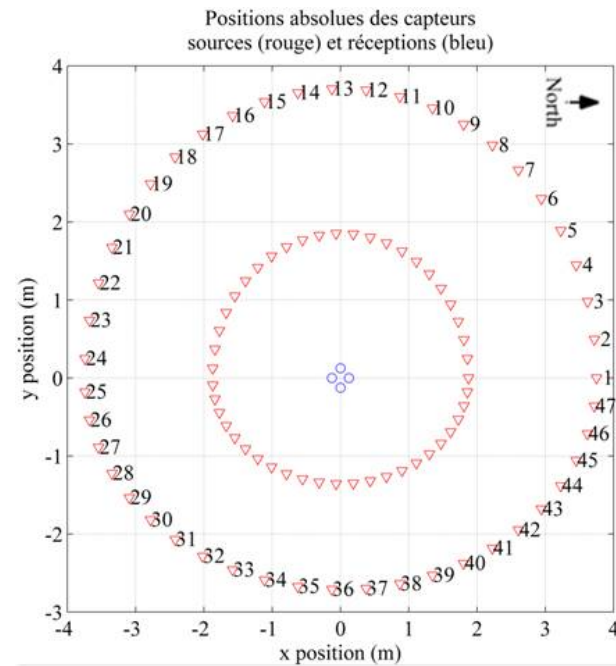
FIGURE 7.8 – Visualisation 3D du positionnement des profils géophysiques sur la digue ; le cercle rouge symbolise la position de l'arbre

L'observation visuelle de la base du tronc semblait montrer un départ d'une racine principale vers l'Ouest. On propose de vérifier cette hypothèse à partir du profil transversal n°5 situé à 1,5m déporté du tronc.

Enfin deux profils de prospection acoustique sous forme de cercles concentriques de rayons de 1.5 puis 3 m autour du tronc sont réalisés en complément. La figure 7.9 ci-dessous illustre la géométrie d'acquisition utilisée pour la méthode acoustique avec le positionnement des capteurs de réception sur le tronc. 47 mesures sont réalisées pour achever un cercle complet de 360° autour de l'arbre. Chaque mesure est donc distante respectivement pour chaque cercle de 10 et 15° d'angle. Cet angle élémentaire détermine la résolution angulaire.



(a) Géométrie d'acquisition des rais de propagation Source-Récepteurs formant un cercle concentrique autour de l'arbre



(b) Détermination des positions tenant compte des effets de topographie (projection en plan)

FIGURE 7.9 – Géométrie d'acquisition de tomographie sol/tronc utilisé sur l'arbre d'étude

Il est important d'avoir une bonne connaissance des coordonnées dans un même repère des positions de la source ainsi que celles des capteurs de réception sur le tronc afin de connaître la distance exacte que l'onde parcourt, les vitesses de propagation étant déterminées par le rapport entre le temps de l'arrivée de la première perturbation et de la distance parcourue.



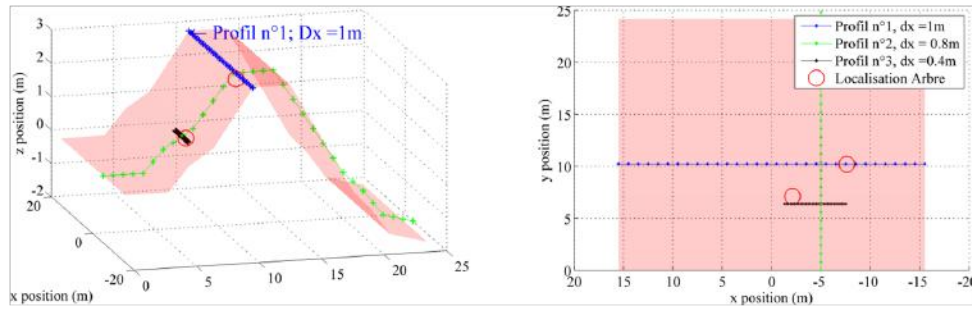
FIGURE 7.10 – *Fixation des capteurs sur le tronc préalablement écorcé suivant les quatre axes principaux (Nord-Sud-Est-Ouest)*

Pour permettre cela, les capteurs sont fixés solidement et de façon fortement jointive au tronc de l'arbre préalablement écorcé lissée (figure 7.10). Ils sont reliés entre eux par le même élastique venant les mettre en pression vers l'intérieur du tronc.

Site du Grand Rhône rive droite

Sur ce tronçon de digue, trois profils de tomographie électrique sont réalisés afin d'intégrer au mieux les variations liées à l'intrusion des systèmes racinaires dans le corps de digue :

- un premier profil long de 32 m est réalisé en crête de digue. Ce profil intègre sur sa longueur deux chênes positionnés à différentes élévations par rapport au sommet de la digue (figure 7.11) ;
- le second profil intègre la digue de façon transversale. Aucune végétation n'est située sur le parement côté val (zone protégée), tandis que deux arbres sont situés à proximité de ce profil côté fleuve. Avec une résolution inter-électrodes de 0,8 m, l'extension de ce profil de part et d'autre du corps de digue nous permet d'imager la digue dans sa totalité ;
- le dernier profil est un profil de plus haute résolution comparé aux précédents car la distance inter-électrodes est de 0,4 m. Située à mi-hauteur de la digue et intégrant les deux chênes situés à chaque extrémité du profil, la section imagée obtenue est de 6 m d'extension pour une profondeur d'investigation d'environ 1 m. Le tableau 7.2 synthétise les paramètres des profils réalisés.



(a) Vue 3D (à gauche) et 2D en vue de haut (à droite) de la position des profils géoélectriques sur la digue



(b) Surperposition des positionnements des profils à la photographie de la digue.

FIGURE 7.11 – Stratégie d’acquisition et positionnement des profils géoélectriques sur la digue du site de Beaujeu (Grand Rhône rive droite)

N° du profil	Nb d’électrodes	Δ_x (m)	L_p (m)	Orientation (/digue)	Séquence	$Z_{estimée}$ (m)
1	32	1	32	L	WS	6
2	32	0.8	25.6	T	WS	5
3	32	0.4	12.8	L	WS	2

Tableau 7.2 – Résumé des paramètres des profils réalisés sur le site d’étude de Beaujeu

7.3.c Préparation in-situ

Prise en compte de la topographie

La topographie des profils transversaux à la digue est prise en compte dans les calculs. Les relevés de pente sont effectués à l’aide d’un clisimètre. Ainsi les coordonnées en altimétrie de chaque électrode sont indiquées avant l’inversion des données. D’après l’étude de Hennig et al. (2005), la mesure de la résistivité est affectée par la topographie. Nous n’avons pas ici effectué de correction (par modélisation) de ces effets, autre que celle réalisée lors de l’étape d’inversion avec Res2dInv (cf. section 7.4 § i).

Analyse préalable de sol

La connaissance du type de sol est importante dans un premier temps pour interpréter les données des mesures physiques réalisées. Une anomalie géophysique correspond à la différence entre les propriétés physiques de la cible recherchée, ici la racine, et du milieu encaissant.

De plus, le type de sol traduit l'environnement de croissance de l'arbre et par conséquent sa ressource vitale. Le développement du point de vue géométrique des systèmes racinaires dépend de l'espèce mais le type de sol joue un rôle prépondérant (Zanetti et al., 2011b). Un sol limoneux est un substrat idéal pour la croissance racinaire, car il apporte des éléments nutritifs et possède une bonne capacité de rétention de l'eau.

Enfin, le type de sol permettra aussi de conclure sur le risque d'érosion interne associé à la décomposition racinaire. Un sol cohésif aura plutôt tendance à conserver les galeries de décomposition à l'opposé d'un sol granulaire (Zanetti et al., 2011b). Ainsi, nous avons pris connaissance des paramètres de sol suivants :

- granulométrie du sol : lors de notre étude aucun prélèvement de sol n'a été effectué. Le type de sol est identifié uniquement de par la connaissance générale de la construction de la digue. Nous estimons que les digues sont a priori constituées de matériaux fins de type limoneux. A proximité de la végétation, une couche d'humus en surface est présente (voir observations visuelles) ;
- teneur en eau du sol : à l'aide d'une sonde de teneur en eau (WaterMark TDR DeltaT), le pourcentage volumétrique de teneur en eau en surface est estimé lors de chaque prospection.

7.4 Traitement et interprétation des données

Dans cette partie nous introduisons les traitements effectués avant l'interprétation des données. Tout comme pour le choix des paramètres instrumentaux, nous introduisons, en faisant le lien avec les résultats obtenus en conditions contrôlées et semi-contrôlées, des éléments d'interprétation des résultats.

7.4.a Méthode électrique

i Présentation des résultats inversés

Les données sont inversées à l'aide du logiciel RES2DINV©. Le principe est explicité dans la section 2.2.d du chapitre 2. Cette étape de traitement est indispensable lorsque le terrain est hétérogène. Les résistivités mesurées sur le terrain permettent de construire une pseudo-section de résistivité et profondeurs apparentes. L'étape d'inversion des données permet d'obtenir les sections avec des profondeurs vraies et des résistivités. De plus, en introduisant les coordonnées (Z) des électrodes, des corrections topographiques sont réalisées.

En sortie de traitement, les résultats sont présentés selon deux paramètres physiques traduisant les propriétés électriques du milieu : l'amplitude de la résistivité ainsi que la chargeabilité totale.

ii Interprétation sur la détection de racine et estimation empirique de la géométrie/masse racinaire

Les images géophysiques après inversion ne sont que des estimations de la géométrie et de la masse des systèmes racinaires étudiés. Les anomalies du potentiel mises en évidence peuvent

néanmoins être corrélées avec la nature des sols ou la présence de racines grâce aux expériences réalisées préalablement en laboratoire ou encore à des tables obtenues dans la littérature. Ainsi on estime que la gamme de résistivité des argiles est située entre 5 et 100 Ω m, environ entre 1 à 500 Ω m pour les limons, alors que les matériaux plus grossiers de type sables ou graviers apparaîtront plus résistants avec une gamme comprise entre 800 et 6000 Ω m, d'après [Palacky \(1988\)](#).

Selon [Hagrey \(2007\)](#), les matériaux organiques, plus particulièrement le bois, sont contenus dans une large gamme de résistivité électrique. L'étendue de la gamme est due aux différences de composition physique et chimique (densité, teneur en eau et ions, pourcentage d'aubier/duramen...) suivant le diamètre de la racine observée et l'espèce. Bien que les gammes de résistivité soient parfois confondues, d'après les essais menés en laboratoire et in-situ sur un sol limoneux (cf. sections [6.1](#) et [6.2](#)), les racines apparaissaient systématiquement comme des anomalies de résistivité électrique positives dans le sol.

Nous disposons de moins d'information sur l'évolution du terme de chargeabilité. A nouveau, nous utilisons la connaissance acquise lors de nos expériences en laboratoire, montrant qu'autour de 1 Hz, la présence de matériaux biologiques affecte le terme de chargeabilité. De façon général, la chargeabilité augmente en présence de matériaux biologiques de type racine (excepté lors de l'expérience de monitoring où l'arbre était placé en stress-hydrique et le sol avait été remanié). De plus, la prédominance des racines sur le terme de chargeabilité est plus visible pour un sol sec (cf. section [6.3](#)).

7.4.b Méthode acoustique

i Présentation des résultats

Les résultats sont représentés sous forme polaire, à savoir la variation du paramètre physique étudié de l'onde en fonction de l'angle de rotation autour du tronc. La vitesse de propagation, ainsi que les propriétés spectrales de l'onde résultante sont étudiées :

- Paramètre n°1 : vitesse de propagation de l'onde de première arrivée
L'impulsion source étant synchronisée avec les capteurs de réception, il est possible de déterminer le temps de parcours source-réception de l'onde acoustique. Le pointé de la première onde arrivée sur le capteur est réalisé manuellement. La détermination des incertitudes sur le temps de vol (et donc sur la vitesse) permet de définir le seuil pour lequel les variations des vitesses angulaires observées sont significatives.
Le calcul des incertitudes sur le pointé provient de la formule [2.42](#) détaillée dans la section de l'état de l'Art.
- Paramètre n°2 : amplitude de l'onde reçue sur le tronc
La détermination de l'amplitude de l'onde reçue sur un capteur réception situé sur le tronc traduit les effets d'atténuation en énergie de l'onde au cours de son parcours. L'atténuation en énergie d'une onde mécanique est due essentiellement à une décroissance dite géométrique avec la distance D ($\frac{1}{D^2}$) mais aussi par les propriétés intrinsèques du milieu qui porte l'onde.
Le calcul de l'amplitude RMS (root mean square) provient de la formule [2.43](#) détaillée dans la section de l'état de l'Art.
- Paramètre n°3 : modification des propriétés spectrales de l'onde
Les propriétés spectrales, c'est-à-dire les fréquences composant le signal temporel, sont déterminées soit par des traitements classiques dits d'analyse de Fourier, d'analyse

temps-fréquence (par la transformée de Fourier à fenêtre glissante) soit par des traitements plus complexes dits d'analyse temps-échelles (par la transformée en ondelettes). L'information spectrale permet de retrouver des signatures spécifiques du milieu traversé par l'onde. Par exemple, certaines fréquences contenues dans le signal source sont soit atténuées ou au contraire amplifiées lors de la propagation dans le milieu. C'est ce caractère dispersif de l'onde qui traduit les propriétés d'un matériau.

Les calculs des propriétés spectrales proviennent des formules 2.44 et 2.46 détaillées dans l'état de l'Art.

ii Interprétation sur la détection de racine

La détection d'anomalies racinaires par la méthode acoustique repose sur l'hypothèse qu'il existe une différence d'impédance acoustique entre le sol et la racine. L'impédance acoustique est définie par le produit entre la vitesse de propagation d'une onde mécanique et la masse volumique du milieu portant l'onde. Lors d'expériences en laboratoire (section 5.2), nous avons déterminé à partir d'analyses d'échantillons que la vitesse moyenne des ultrasons (54 kHz) dans une racine est en moyenne (pour un bois sain) supérieur à 1000 m/s alors que pour un sol de type limoneux la vitesse est approximativement de 400 m/s (dans les conditions de teneur en eau et compaction de l'expérience).

Suivant leur type et donc leur composition anatomique, les racines ont une masse volumique d'environ 400 kg/m^3 pour des grosses racines ($\geq 10 \text{ cm}$) saines. Pour un sol, sa masse volumique dépend notamment de son compactage. On donne une masse volumique d'environ 1500 kg/m^3 pour des limons, et une masse volumique plus faible ($\geq 1000 \text{ kg/m}^3$) pour les matériaux de type tourbe. L'impédance acoustique traduit aussi les effets d'atténuation. Ces effets se manifestent par une perte d'énergie lors de la propagation de l'onde. Plus l'impédance acoustique est grande, moins les effets d'atténuation seront forts. Ceci définit un second critère potentiel de différenciation entre le sol et la racine.

Enfin, l'impédance acoustique est dépendante de la fréquence de l'onde, car les vitesses de propagation dépendent de la fréquence. Ce phénomène est appelé dispersion en fréquence. La dispersion est une marque spécifique du milieu ayant porté l'onde et nous étudions aussi les propriétés spectrales de l'onde pour la détection de racines. Néanmoins, nous ne disposons que de peu de repères bibliographiques, hormis ceux obtenus en laboratoire et n'ayant pas donnés de tendance significative, pour interpréter les résultats sur la dépendance spectrale des matériaux biologiques. Nous considérons donc que les matériaux biologiques tels que les racines possèdent une impédance acoustique bien plus élevée que les sols. Sur la représentation des résultats, cela se manifestera donc par des vitesses de propagation plus élevées ou une atténuation plus faible (c'est-à-dire une amplitude en réception plus forte) en présence de racines.

L'interprétation peut être biaisée par des erreurs de mesures ou des incertitudes sur les calculs de vitesses, d'amplitudes et du résultats spectre. Par exemple, la figure 7.12 traduit sous forme d'abaques le biais, sur la distance réelle et par conséquent sur les vitesses mesurées lorsque l'on introduit les effets de tortuosité des racines (propagation non rectiligne de l'onde).

Dans la suite de notre étude, nous avons considéré arbitrairement une tortuosité de 10%. Pour les cercles de rayon 1.5 et 3 m cela entraîne respectivement une erreur sur la distance source-récepteur d'environ 0,1 m et 0,2 m. Systématiquement, les erreurs sur le pointé ainsi que sur la tortuosité seront représentées sur les résultats de la vitesse de propagation.

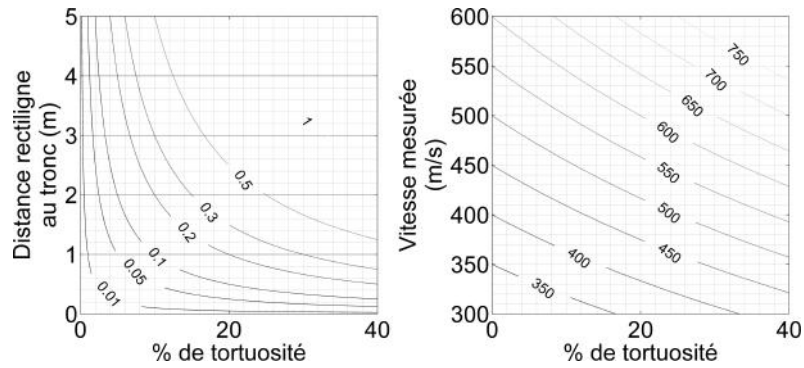


FIGURE 7.12 – *A gauche : erreur en mètre sur l'estimation de la distance au tronc ; à droite : vitesse réelle en fonction de la tortuosité et de la vitesse mesurée*

7.5 Résultats et discussions

7.5.a Petit Rhône rive gauche

Les prospections sur ce site d'étude ont été réalisées durant les journées du 16 au 18 février 2015. Les événements pluvieux (la semaine précédente) avant les essais ont conduit à une teneur en eau volumique superficielle moyennée sur l'ensemble des profils d'environ 28%.

i Évolution spatiale basse résolution

Les sections représentées ci-dessous sont issues de profils longitudinaux à la digue. Le premier profil intègre trois chênes à différentes positions suivant l'axe X correspondant à l'orientation de la digue. Tous les points de mesures ont été conservés.

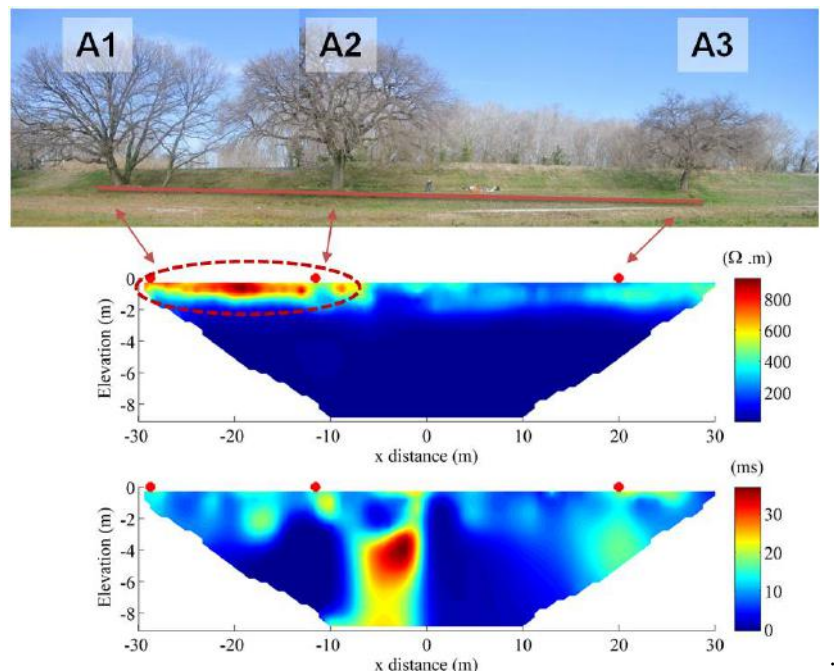


FIGURE 7.13 – *Section n°1 inversée ; espacement inter-électrodes =1 m ; profil de 64 m réalisé en Wenner-Schlumberger. Les points rouges représentent la position des arbres sur le profil. En haut : amplitude de la résistivité électrique/ En bas : amplitude de la chargeabilité totale*

Nous distinguons sur l'amplitude des anomalies de résistivité au niveau des deux premiers mètres de profondeur. Les zones hypothétiques de développements racinaires à l'aplomb des arbres se manifestent par des résistivités plus fortes de l'ordre de $800 \Omega \text{ m}$ (zone délimitée en pointillée) dans un sol encaissant de $200 \Omega \text{ m}$. Au-delà des deux premiers mètres et aux abscisses comprises entre $X = [0, 15] \text{ m}$, où aucun arbre n'est recensé, le terrain semble homogène, de résistivité $200 \Omega \text{ m}$.

Par comparaison le terme de chargeabilité semble aussi affecté par la présence d'arbres en surface, et cela se manifeste par des anomalies plus localisées. Cependant, une grosse anomalie de chargeabilité est visible à grande profondeur entre 4 m et 6 m qui ne peut vraisemblablement pas être expliquée par la présence de racines.

ii Évolution spatiale haute résolution

Les sections représentées ci-dessous (figure 7.15) sont issues de profils de longueur 6,4 m et de résolution inter-électrodes de 0,2 m. Ces profils sont centrés sur le chêne n°2 à différentes altitudes, nous étudions par conséquent le développement racinaire suivant la direction transverse à la digue.

Le profil *p3* est situé au pied du talus côté val et permet d'évaluer l'intrusion potentielle des racines dans le corps de digue. Le profil *p2* est situé à proximité de l'arbre (environ à 50 cm). Ce profil passe à l'amont de l'arbre - i.e côté fleuve - comme le profil de la figure 7.13 (le *p2* est un zoom du *p1*). Le dernier profil *p5* se situe en pied de talus de la risberme au bord du chemin.

Clairement, le profil situé le plus proche de l'arbre (*p2*) montre les anomalies de résistivité les plus importantes de l'ordre de $400 \Omega \text{ m}$ pour des profondeurs comprises entre 0 et 50 cm. Ces mêmes effets sont visibles sur le terme de chargeabilité avec cependant moins de contraste.

Nous portons un intérêt particulier à l'interprétation du profil *p3* car il est situé en pied de digue : il serait en effet intéressant de pouvoir y vérifier s'il y a intrusion ou non de racines à travers le corps de digue. Nous remarquons que ce profil se charge plus dans les premiers décimètres de profondeur avec des anomalies de chargeabilité de l'ordre de 40 ms (contre 20 ms pour l'encaissant). Parallèlement, la résistivité montre de fortes anomalies (néanmoins plus faible que sur le profil près de l'arbre), plus localisées d'environ 10 à 20 cm d'extension (entouré en rouge pointillé) pouvant s'apparenter à la présence de racines isolées traçantes superficielles. A noter tout de même que l'observation visuelle avait permis d'identifier la présence potentielle de gravats de laitiers ayant glissés le long du parement. Leurs présences en sub-surface peut créer de fortes résistivités pouvant aussi expliquer les anomalies localisées identifiées sur le profil *p3*.

Enfin, nous distinguons sur la section *p5* située à mi-hauteur de la risberme deux couches de différentes natures. Une première couche de 0 à 50 cm, est très peu résistive (inférieur à $50 \Omega \text{ m}$) et se charge peu avec une chargeabilité totale de 10 ms. Cette première couche semble correspondre à la couche de matériaux rapportés de la digue, avec en surface une couche riche en matière organique (litière et humus). Au-delà de 50 cm de profondeur, la résistivité ainsi que la charge augmentent parallèlement. Cela correspond au terrain naturel d'une nature différente.

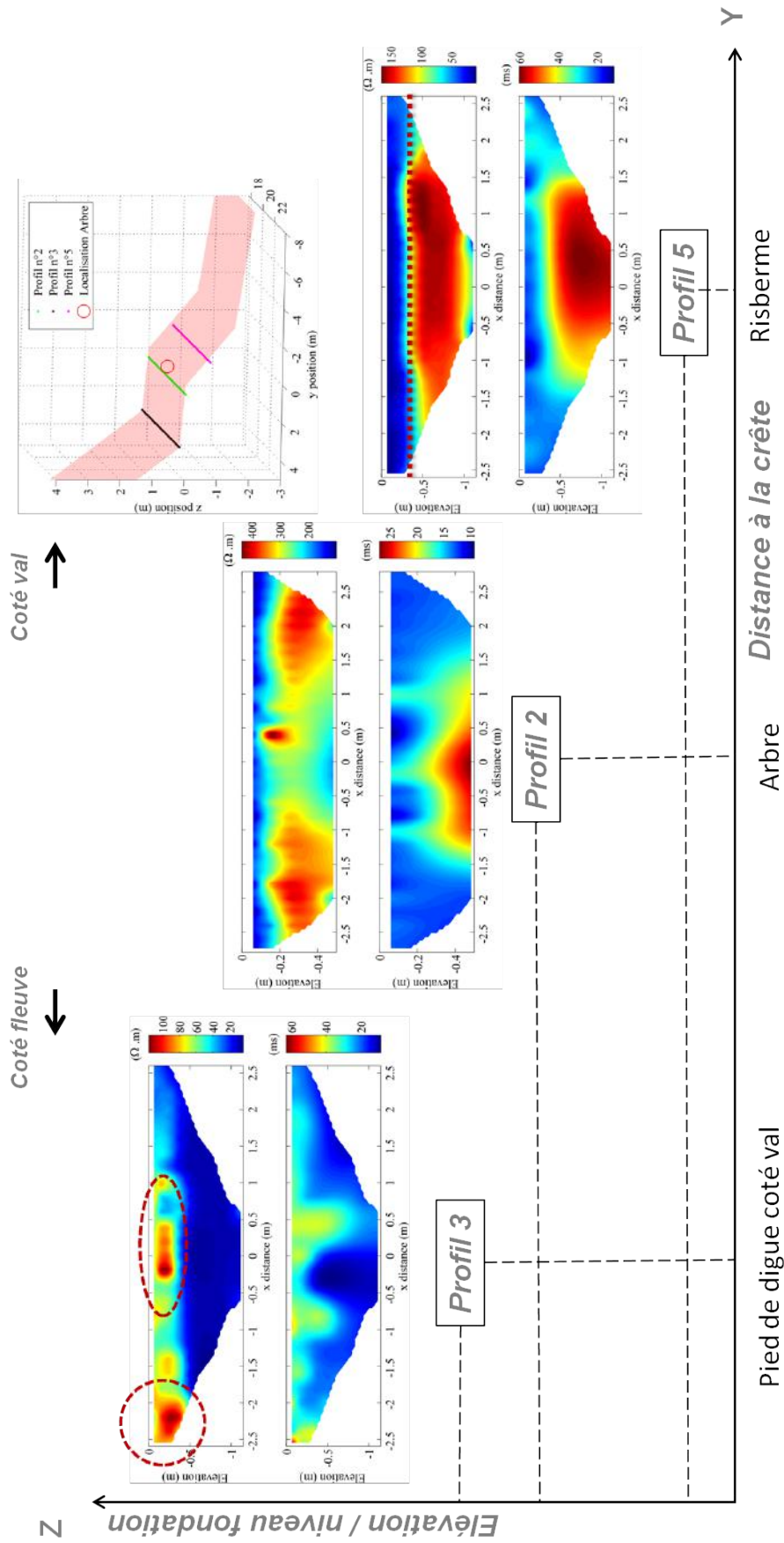


FIGURE 7.15 – Profils 3, 2 et 5 inversés; espacement inter-électrodes = 0,2 m; profils de 6,4 m réalisés en Wenner-Schlumberger. En haut : amplitude de la résistivité électrique/ En bas : amplitude la chargeabilité totale; échelles indépendantes permettant une meilleure visualisation des contrastes

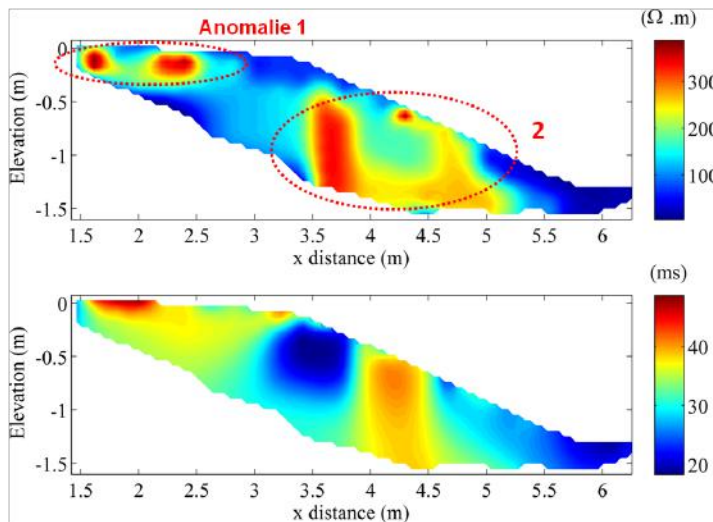
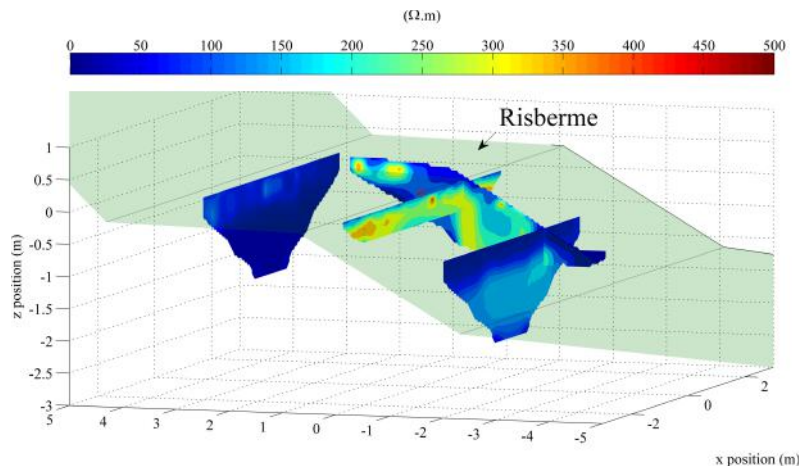


FIGURE 7.14 – Profil $p4$ inversé (voir positionnement sur la figure 7.8); espacement inter-électrodes = 0,2 m; profils de 6,4 m réalisés en Wenner-Schlumberger. Identification des anomalies 1 et 2.

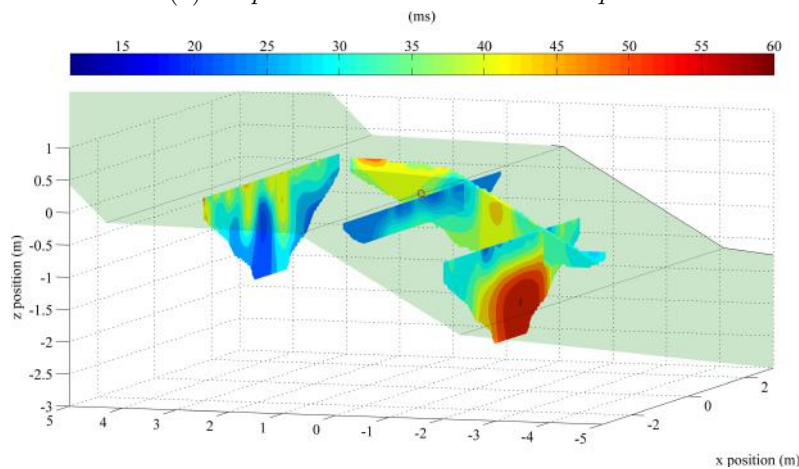
Le profil représenté sur la figure 7.14 ci-dessus a été réalisé afin d'évaluer la croissance des racines dans la direction longitudinale. Rappelons que l'observation visuelle a montré un départ probable d'une racine dans cette direction, sans pour autant savoir si celle-ci reste en surface ou bien croît en profondeur. Visuellement, deux anomalies peuvent être identifiées (figure 7.14) : celles-ci sont peu locales et plutôt étirées. L'amplitude de l'anomalie est relativement importante sur le terme d'amplitude, de l'ordre de $400 \Omega \cdot m$ mais aussi sur le terme de chargeabilité 40 ms environ. Il est peu probable que l'anomalie 2 soit générée par une unique racine isolée étant données sa taille et son amplitude. A partir de ce constat deux hypothèses peuvent l'expliquer : soit la racine s'est ramifiée, soit il y a un changement de constitution du sol.

L'hypothèse de la ramification de la racine primaire en plusieurs racines plus fines partant dans différentes directions et avec différents angles par rapport à l'horizontale irait dans le sens d'un système racinaire fasciculé lié à la nature des matériaux et à la présence d'eau à relativement faible profondeur.

La représentation en trois dimensions de la figure 7.16 permet de montrer visuellement la cohérence entre les profils mesurés. A noter que cette représentation présente quelques limites car il s'agit d'une représentation de plusieurs profils inversés en 2D alors que le milieu (remblai corps de digue, fondation et racines) est forcément complexe et 3D.



(a) Amplitude de la résistivité électrique



(b) Amplitude la chargeabilité totale

FIGURE 7.16 – Positionnement des plans 2D sous une représentation 3D vue transverse à la digue; les échelles de couleurs sont dépendantes; le point rouge indique la position de l'arbre

Il y a bien une continuité aux intersections de chacun des profils sur le terme de résistivité et sur le terme de chargeabilité, ce qui indique que la mesure est cohérente. De plus cette représentation permet de visualiser au mieux l'extension du système racinaire. Nous constatons qu'en pied de talus en amont de la risberme, les anomalies sont moins prononcées qu'à proximité de l'arbre. La densité racinaire semble donc diminuer avec la distance au tronc dans cette direction..

iii Évolution spatiale haute résolution acoustique

Analyse préliminaire

Certaines des questions scientifiques qui suivent ont fait l'objet d'une étude lors des essais acoustiques en milieu semi-controlés. Nous nous assurons ici de leur validité à travers l'étude en conditions réelles.

- Quelles sont les propriétés spectrales de l'onde la première arrivée ?

Une onde incidente est émise à la surface du sol et se propage pour être enregistrée à partir des capteurs situés à la base du tronc. Dans un milieu hétérogène, les caractéristiques de cette onde au cours de son parcours sont modifiées lorsqu'elle est transmise, réfractée

ou encore réfléchi. Le comportement de l'onde la première arrivée, en termes de vitesse de propagation ou de propriétés spectrales, permet d'apporter des éléments de réponse sur la nature de sa propagation et donc sur la façon la plus appropriée de l'enregistrer. Caractériser la nature de l'onde la première arrivée est cependant un problème complexe. Pour le résoudre, nous nous sommes inspirés d'études portant sur l'amélioration des pointés automatiques de la première perturbation à partir de critères spectraux. Dans notre cas, cette étude a pour objectif d'évaluer si la géométrie (placement et nombre) des capteurs de réception ainsi que leur nature (fréquence centrale) est bien adapté à l'enregistrement de l'onde.

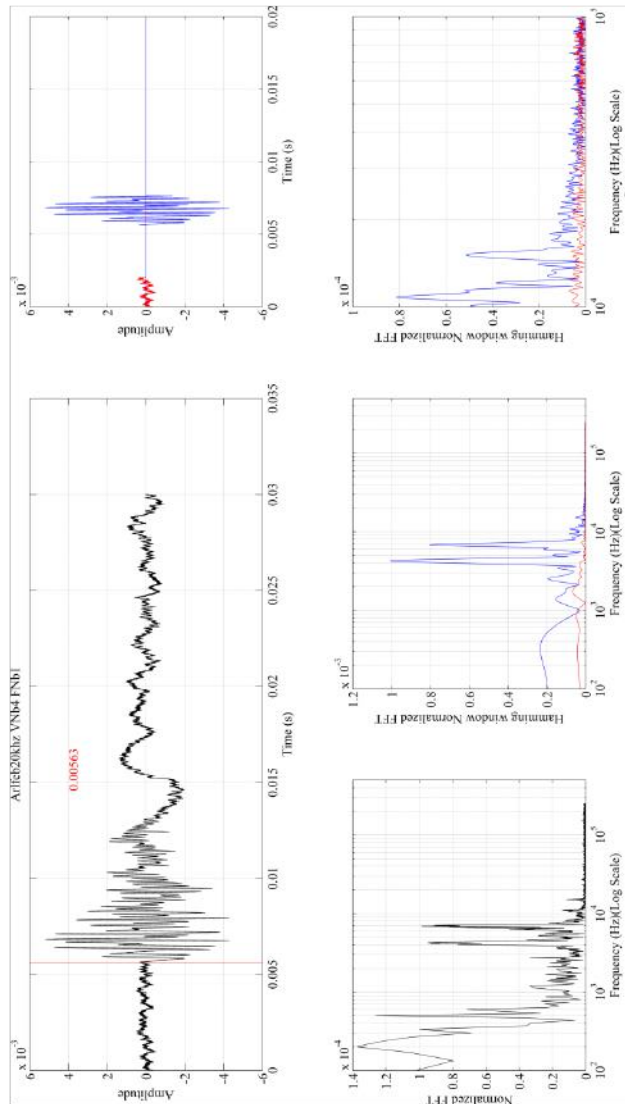


FIGURE 7.17 – Etude des propriétés spectrales de l'onde la première arrivée (enregistrement à partir des capteurs à 24kHz)

Techniquement, soit à partir de l'analyse de la transformée de Fourier (ou d'autres analyses non biaisées telles que la densité spectrale ou le périodogramme), soit par la transformée en ondelettes, il est possible de trouver la fréquence de l'onde la première arrivée. Pour cette étude, nous avons sélectionné un signal issu de la transmission à l'angle 0°N , enregistré sur un capteur de type Sofranel ($f_c = 24\text{kHz}$). Nous appliquons la transformée de Fourier sur la fenêtre préalablement définie en considérant 200 points encadrant le

temps de l'arrivée de la première onde soit un temps de 0,4 ms, la durée totale du signal étant de 30 ms. Afin de réaliser la transformée de Fourier proprement, nous utilisons une fenêtre de pondération de type Hamming.

D'après la figure 7.17, nous observons clairement deux spectres différents avant (en rouge, correspondant au bruit) et à l'arrivée de l'onde (en bleu). La fréquence fondamentale est située à approximativement 6×10^3 Hz. Un autre pic de forte amplitude correspondant à un second mode de propagation est situé légèrement au delà à 8×10^3 Hz.

A partir d'une transformée de Fourier, il existe mathématiquement une incertitude temps/fréquence, qui ne permet pas d'obtenir à la fois une bonne résolution sur le temps de la première arrivée et sur la fréquence. C'est pourquoi on s'intéresse au résultat de la transformée en ondelettes du signal qui permet de limiter ce problème. De plus, l'analyse en ondelettes permet de détecter l'évolution spectrale au cours du temps, c'est-à-dire, le temps de la première arrivée, sa fréquence, son amplitude, mais aussi l'apparition d'ondes secondaires issues de multiples phénomènes (réflexions, réfractions, échos...) à différentes interfaces (racine/racine, sol/racine, racine/tronc...).

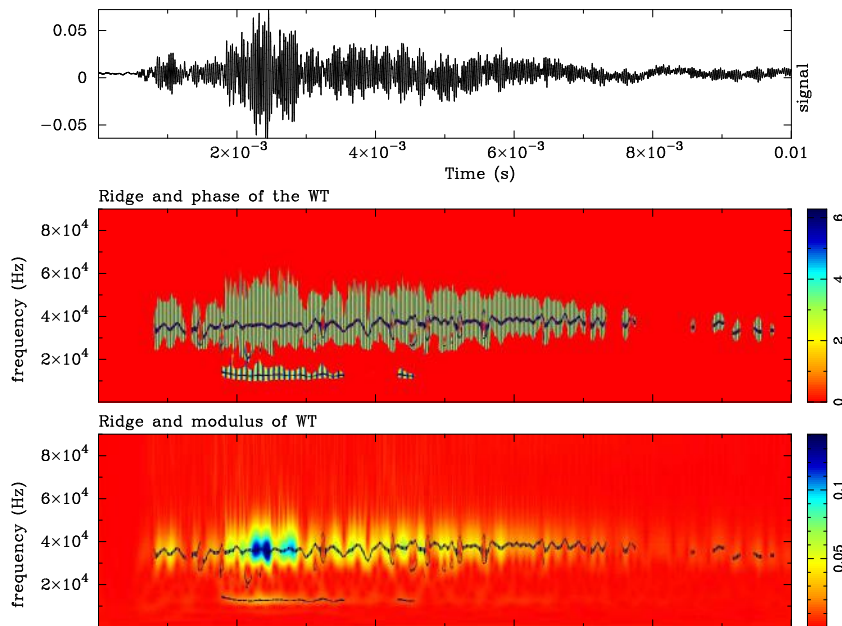


FIGURE 7.18 – Identification des modes de propagation de l'onde par transformée en ondelettes

La figure 7.18 montre sur la phase et sur le module une fréquence dominante - la fondamentale - à $3,2 \times 10^4$ Hz. Cette fréquence est conservée jusqu'à la fin de l'enregistrement du signal. Quelques battements, synonymes d'interférences, sont observés à intervalles réguliers. Un second mode est visible à la fréquence 6×10^3 Hz. Ce mode prend naissance plus tardivement et n'est pas maintenu jusqu'à la fin du signal.

- Les capteurs de fréquences centrales différentes (24 kHz ou 54 kHz) enregistrent ils la même information ?

En complément du traitement réalisé précédemment montrant la nature de l'onde, nous proposons de vérifier expérimentalement que l'information enregistrée avec des capteurs de différentes fréquences centrales change l'information obtenue.

	S/N ^a	Amplitude RMS (V)	F_{max} (Hz)	
Boviar V4	4	$4.10.10^{-5}$	$1.36.10^4$	$2.72.10^4$
Sofranel V4	6	$5.60.10^{-4}$	$6.86.10^3$	$1.09.10^4$

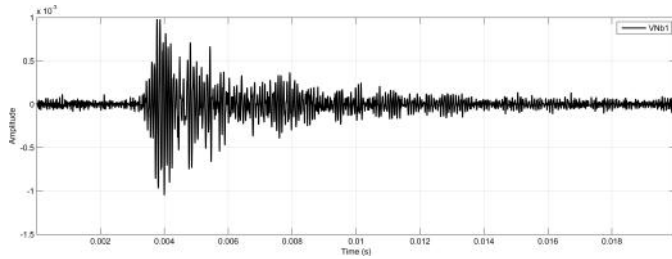
Tableau 7.3 – *Comparaison des caractéristiques (qualité et fréquence fondamentale) des signaux suivant le type de capteurs (Boviar ou Sofranel)*

^a. signal/noise

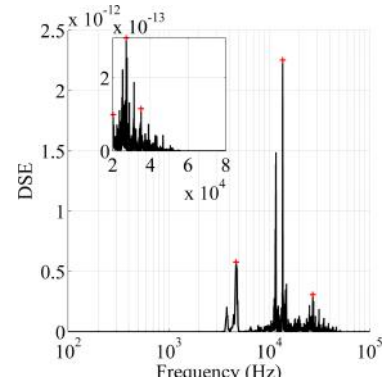
D'après la figure 7.19 et le tableau 7.3, nous remarquons avant tout que les signaux sont de différentes qualités. Pour une même position, le rapport signal/bruit des signaux enregistrés à partir des capteurs de type Sofranel (figure 7.19c) est plus élevé que celui obtenu avec les capteurs par défaut du Boviar (figure 7.19a). Pour différentes voies d'acquisition, le capteur situé en face de la source (la voie 4 - figure 7.19a), possède un rapport S/N bien meilleur que la voie de réception située de l'autre côté du tronc (la voie 3 - figure 7.19e). Ceci s'explique principalement par le fait que la distance source-réception augmente car l'onde traverse le tronc. De plus, l'onde est fortement atténuée dans le tronc car elle se propage dans la direction transversale aux fibres qui est la plus défavorable à la propagation.

Les caractéristiques spectrales sont aussi naturellement modifiées suivant le type de capteurs de réception utilisé. Ainsi la fréquence maximale obtenue avec le capteur du Boviar est légèrement plus élevée que celle du capteur Sofranel. Ceci s'explique par les différentes sensibilités des capteurs. Le capteur Sofranel est plus sensible et son amplitude RMS est plus élevée. L'amplitude de la fréquence maximale est donc aussi supérieur à celle du Boviar.

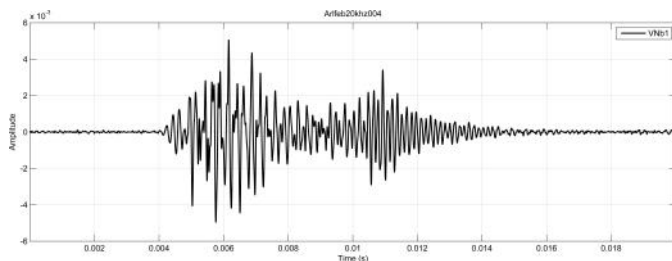
Nous privilégierons pour de futures investigations, l'utilisation des capteurs de type Sofranel car l'information est à plus basse fréquence, ce qui permet d'obtenir une atténuation moins importante et des signaux de meilleures qualités (rapport S/N ≥ 4).



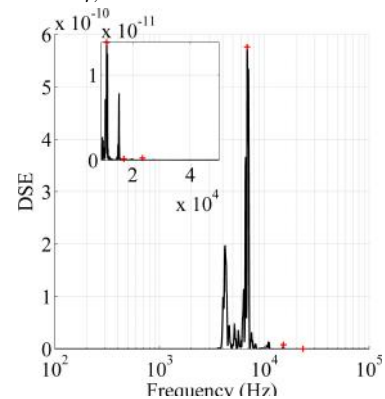
(a) Signal enregistré sur le capteur Boviart ($F_c = 54$ kHz), Voie 4, azimuth $325^\circ N$



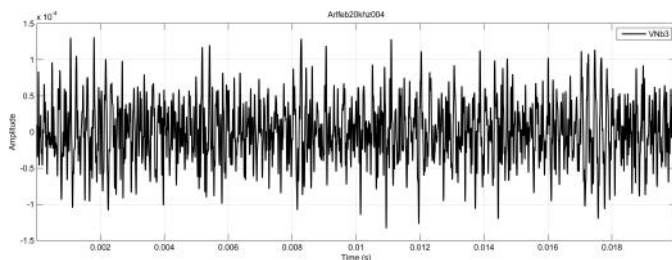
(b) Spectre enregistré sur le capteur Boviart ($F_c = 54$ kHz), Voie 4, azimuth $325^\circ N$



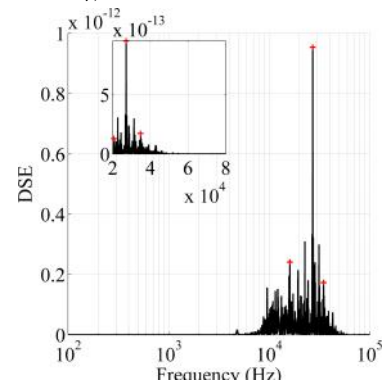
(c) Signal enregistré sur le capteur Sofranel ($F_c = 24$ kHz), Voie 4, azimuth $325^\circ N$



(d) Spectre enregistré sur le capteur Sofranel ($F_c = 24$ kHz), Voie 4, azimuth $325^\circ N$



(e) Signal enregistré sur le capteur Boviart ($F_c = 54$ kHz), Voie 3, azimuth $325^\circ N$



(f) Spectre enregistré sur le capteur Boviart ($F_c = 54$ kHz), Voie 3, azimuth $325^\circ N$

FIGURE 7.19 – Comparaison de la qualité des signaux enregistrés in-situ (Arles Rive Gauche) en fonction du type de capteurs et de l'angle par rapport à la source

- Est-ce pertinent d'interpréter conjointement toutes les voies de mesures ?

Exceptée la voie 3 qui semble moins réagir probablement du fait d'un mauvais couplage avec le tronç, chaque voie mesure systématiquement un signal quelle que soit la position de la source. Ce signal est néanmoins de qualité relative. Une des causes probables des modifications est engendrée par la traversée de l'onde au cœur du tronç suivant la position

du tir source. Le signal va aussi arriver aux différents capteurs potentiellement via des racines différentes ou via différentes ramifications d'une même racine, les signaux ayant traversé une couche de sol d'épaisseur variable se rejoignant à la base de la racine avec un décalage de temps et de qualité. En sélectionnant les signaux ayant un rapport signal sur bruit supérieur à 4, nous constatons clairement à partir de la figure 7.20 qu'une voie de mesure enregistre correctement l'onde lorsque la source est située dans un angle de plus ou moins 90° de part et d'autre du capteur.

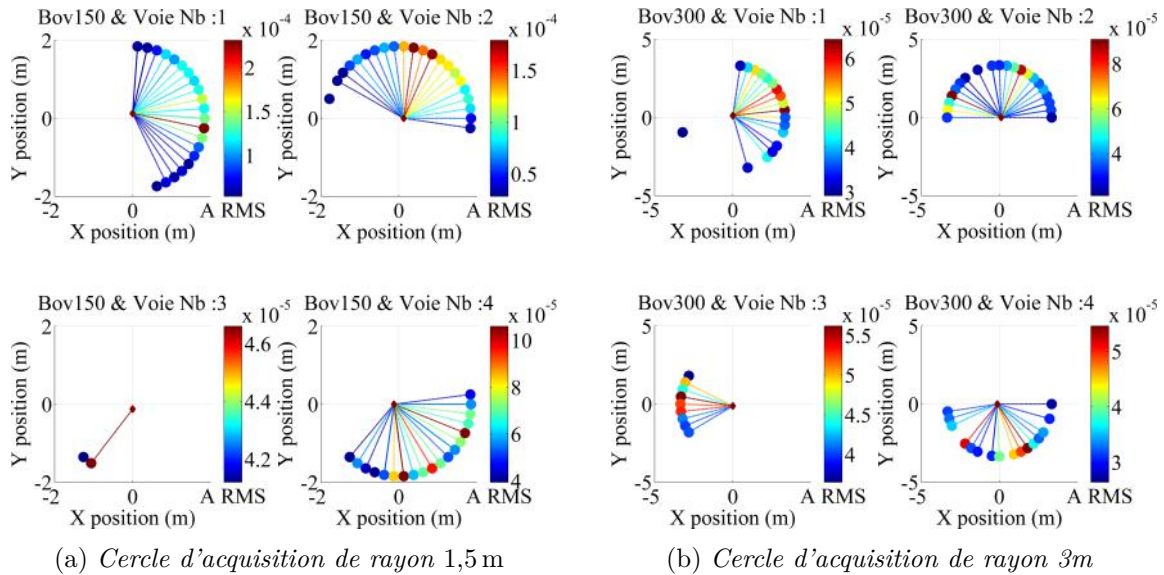
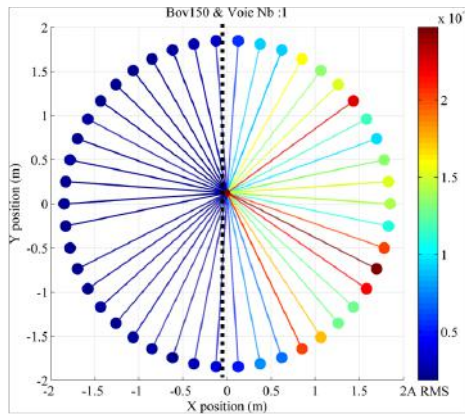


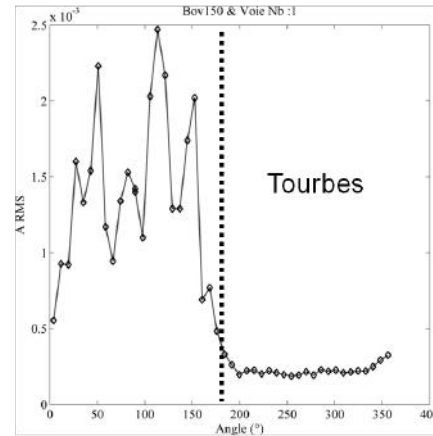
FIGURE 7.20 – Représentation stéréographique de l'amplitude des signaux sélectionnés après détermination du rapport S/N supérieur à 3

- Les différences de composition du sol en surface perturbent-elles l'interprétation ?

Les différences de composition du sol en surface perturbent à la fois l'excitation du sol donc le signal source et par conséquent la propagation dans le milieu de l'onde transmise. A partir de la figure 7.21, nous observons clairement l'influence des variations liées à la composition en surface du sol entre la zone dans la pente située entre 90°N et 270°N où une couche épaisse de litière s'est accumulée, et la zone plane. Dans ce cas, les contrastes entre l'anomalie racinaire recherchée et le sol encaissant changent. Par conséquent, il est préférable d'interpréter les profils indépendamment afin de bien en extraire l'information recherchée.



(a) Représentation polaire de l'amplitude RMS de l'onde enregistrée sur le cercle d'acquisition de rayon $r=1,5$ m



(b) Variations angulaires de l'amplitude RMS de l'onde enregistrée sur le cercle d'acquisition de rayon $r=1,5$ m

FIGURE 7.21 – Variations angulaires des différentes quantités physiques ; capteurs Boviart centrés à 54 kHz ; cercle d'acquisition de rayon $r=1,5$ m

Synthèse du travail préliminaire à la détection

Du point de vue de l'acquisition, les premiers résultats obtenus justifient le fait qu'il est important de positionner suffisamment de capteurs (quatre étant un minimum) sur le tronc afin d'assurer une redondance des données. De plus, le nombre de répétitions à chaque position de la source doit être défini (ici 10 stacks) afin de respecter la condition d'un rapport signal/bruit supérieur à 4, sans quoi il est très compliqué de pointer les signaux.

Cette étude a aussi montré qu'un travail de traitement des données doit être réalisé sur les signaux bruts avant interprétation. Dans un premier temps, il est nécessaire de sélectionner les signaux ayant un rapport signal/bruit suffisamment grand. Ce critère permet d'obtenir une meilleure résolution sur le pointé manuel des temps d'arrivée, mais aussi de déterminer plus facilement les fréquences dominantes du spectre. Il est aussi important de considérer que la traversée de l'onde à travers le tronc induit une erreur à la fois sur la vitesse (car la distance de propagation augmente) mais aussi sur le spectre en fréquences. Ce problème est naturellement résolu car, lorsque les signaux traversent le tronc, le signal rapport/bruit diminue fortement et donc les signaux ne sont pas pris en compte. Enfin nous privilégierons aussi une interprétation en séparant les données si l'on constate de fortes variations de la couche superficielle, la source étant influencée.

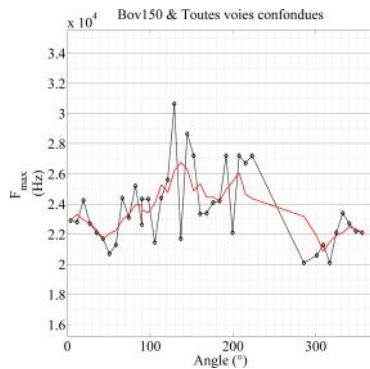
Par ailleurs, il faut bien prendre en compte le fait que sur un arbre de cette taille, il y a sans doute de nombreuses racines différentes capables d'amener le signal du point d'émission au capteur de réception, via des chemins différents dans le sol ce qui complique l'interprétation des résultats.

Résultats de détection

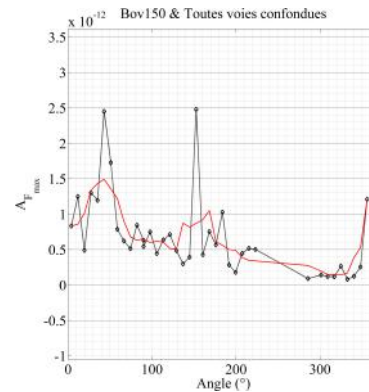
Résultat pour le cercle de rayon $r=1,5$ m

Les figures 7.22 et 7.23 illustrent les variations des différents paramètres physiques obtenus après traitements des signaux issus du cercle d'acquisition $r=1,5$ m. Une sélection des signaux selon le rapport S/N, puis un calage (normalisation) et assemblage des voies sont effectués.

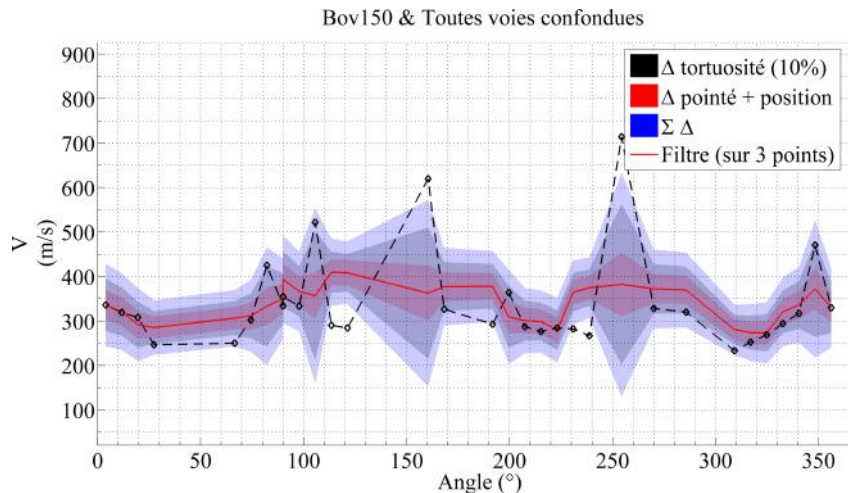
Quel que soit le capteur utilisé, la dispersion de la série de données des paramètres spectraux (f_{max} et $A_{f_{max}}$) est importante. L'origine de cette dispersion peut être liée à la présence d'une anomalie mais aussi et plus probablement au bruit de mesure (des précisions sont apportées dans la section ci-après). Pour s'affranchir des changements de lithologie du sol, nous proposons d'interpréter les variations angulaires à partir d'une courbe de tendance, calculée par la méthode de la moyenne mobile (centrée sur les points concernés) sur trois points. Ainsi l'amplitude du contraste est évaluée par rapport à la moyenne locale du paramètre défini par la courbe de tendance.



(a) Fréquence fondamentale identifiée dans la gamme de fréquence $f=[2.10^4 \ 8.10^4]$ Hz



(b) Amplitude de la fréquence fondamentale



(c) Variations de vitesse de propagation de l'onde la première arrivée

FIGURE 7.22 – Variations angulaires des différentes quantités physiques ; capteurs Boviarr centrés à 54 kHz ; cercle d'acquisition de rayon $r=1,5$ m

Aucun pic ne semble être significativement différent de la courbe de tendance sur les variations angulaires de f_{max} (figure 7.22a), alors que deux pics sont visibles sur les variations angulaires de $A_{f_{max}}$ (figure 7.22b) pour les angles 50° et 150° . A partir de la figure 7.22c nous dénombrons deux pics pour lesquels la vitesse augmente significativement pour les angles 165° et 260° , respectivement de $+200$ et $+300$ m/s par rapport à une moyenne stable d'environ 350 m/s.

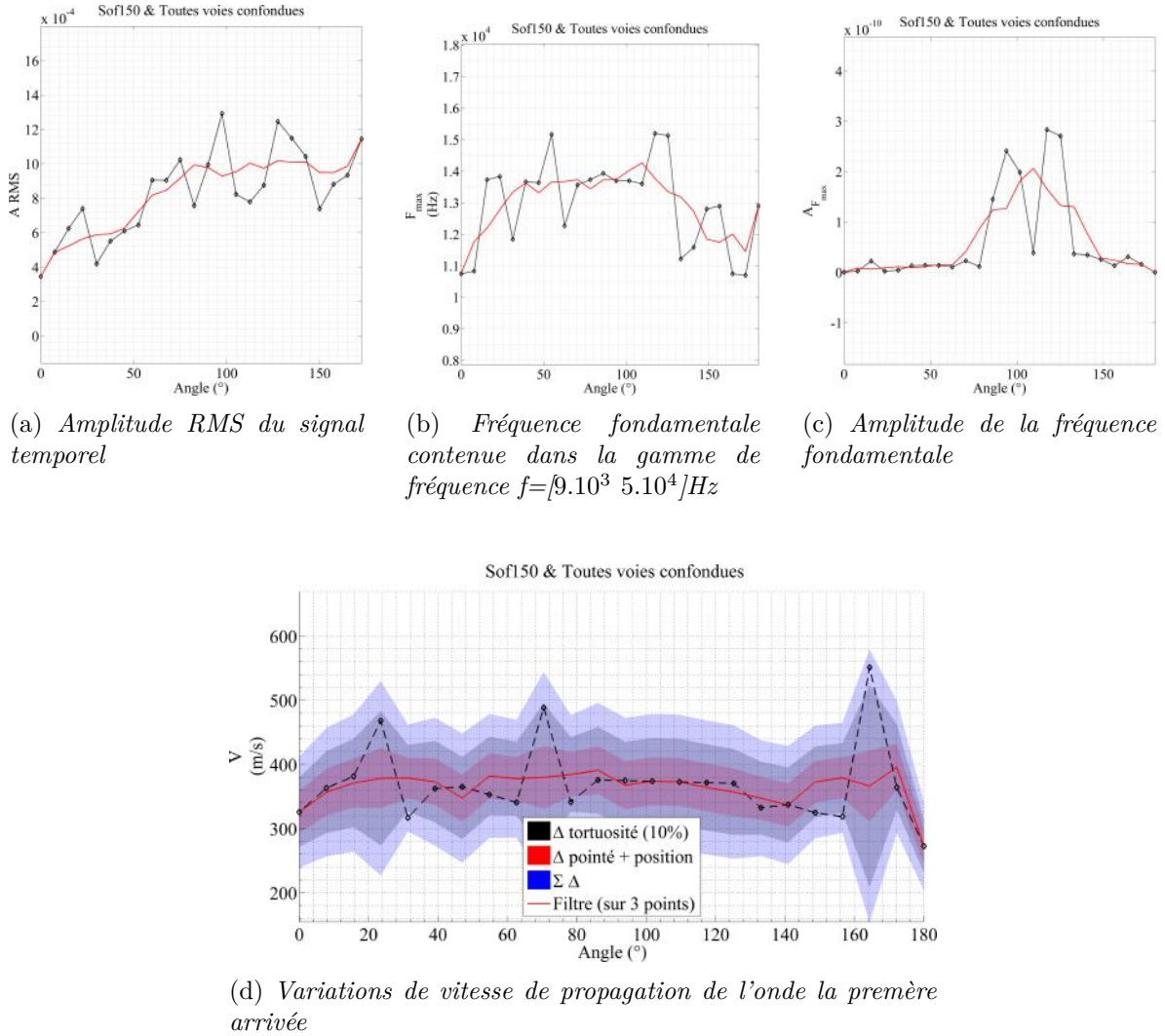


FIGURE 7.23 – Variations angulaires des différentes quantites physiques ; capteurs Sofranel centrés à 24 kHz ; cercle d'acquisition de rayon $r=1,5\text{ m}$; les données ont été acquises uniquement sur un demi-cercle de 0 à 180°

A l'aide des capteurs de marque Sofranel, aussi bien sur les variations de A_{RMS} (figure 7.23a) que sur f_{max} , aucun pic ne ressort de manière significative de la courbe de tendance. En revanche sur le terme $A_{f_{max}}$ (figure 7.23c), deux pics apparaissent clairement pour les angles 100° et 125° .

Les deux capteurs ne montrent pas de pic similaire (à la même position) sur l'amplitude (A_{RMS}) et sur l'analyse spectrale (f_{max} et $A_{f_{max}}$). Cela signifie que nous ne pouvons pas accorder de confiance à ce résultat et que l'origine des pics est plus probablement liée à la dispersion de la mesure. En revanche, on retrouve pour le capteur Sofranel (figure 7.23) un pic significatif de vitesse à 165° , identique à celui identifié à partir du capteur Boviar.

Résultat pour le cercle de rayon $r=3\text{ m}$

De même que pour le cercle d'acquisition de rayon $r=1,5\text{ m}$, la figure 7.24 illustre les variations de la vitesse obtenue après traitements (sélection des signaux selon le rapport S/N

puis un calage et assemblage des voies).

Les paramètres d'amplitude A_{RMS} et spectraux f_{max} et $A_{f_{max}}$ montrent une disparité encore plus importante que pour le cercle d'acquisition de rayon 1,5 m. Il n'est donc pas concevable d'en tirer une information certaine sur la détection de racines. En revanche, la série de données fournie par le profil de vitesse (figure 7.24) semble être un bon point de départ pour l'interprétation, les pointés étant réalisés manuellement et sur des signaux de bonne qualité. La vitesse moyenne est stable tout au long du profil (350 m/s) et deux pics sortent du domaine d'incertitudes aux angles 265° (450 m/s) et 345°. A noter, en comparant les figures 7.22 et 7.24, la similitude entre les deux cercles, de l'amplitude (450 m/s) et de la position angulaire (aux erreurs de placement près) du pic de vitesse (260° pour $r=1,5$ m et 265° pour $r=3$ m).

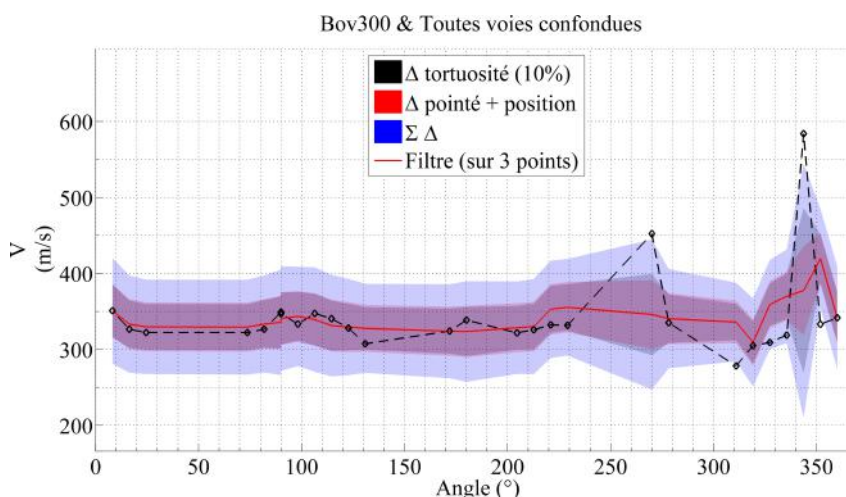


FIGURE 7.24 – Variations de vitesse de propagation de l'onde la première arrivée ; capteurs Boviar centrés à 54 kHz ; cercle d'acquisition de rayon $r=3$ m

Limites observées et propositions

Les points ci-dessous résument les apports, les difficultés rencontrées et des propositions afin de mieux estimer chacun des paramètres.

- Paramètre amplitude A_{RMS} de l'onde

Le signal moyenné de A_{RMS} traduit bien les variations de lithologie mais n'a pas apporté d'informations sur la localisation de racine. En théorie, nous nous attendons à ce que la différence d'amplitude de l'onde transmise enregistrée soit contrôlée par la différence de densité (d'impédance acoustique) entre le sol et la racine. Or, il semblerait que la différence observée ne soit pas uniquement liée au chemin emprunté par l'onde mais aussi à la nature de l'onde transmise à travers le sol. En ce sens, deux points peuvent expliquer la variabilité de la série de données :

- le premier est que les différences de composition du sol influent sur la nature de l'onde incidente, en particulier sur l'énergie transmise (figure 7.21) ;
- le second, est que la source est non normalisée, car elle est contrôlée par un coup de masse porté par un opérateur. Afin d'améliorer l'acquisition et profiter du terme d'amplitude, il serait intéressant d'envisager de travailler avec une source normalisée et de placer un capteur de réception à proximité de l'impact afin de vérifier que la

nature de l'onde ne varie pas de façon trop importante.

Dans la mesure où la couche superficielle du sol est toujours très hétérogène en raison des nombreuses perturbations qui l'affectent (apports de matière organique par les végétaux, érosion localisée, décapage, retournement ou piétinement par des animaux, ...), il paraît nécessaire de décapier superficiellement le sol avant les mesures si on utilise une plaque métallique ou d'utiliser un autre dispositif transmetteur que l'on enfonce dans le sol.

Les problèmes d'interprétation de fréquences et d'amplitude du signal doivent aussi être discutés en prenant compte le fait qu'un système racinaire n'est pas composé de simples "tuyaux" mais d'un réseau complexe de racines de toutes tailles qui se ramifient, et qui peuvent parfois zig-zaguer voire faire des demi-tours.

- *Paramètre vitesse de l'onde*

La vitesse de l'onde acoustique est le paramètre qui semble expliquer le mieux les variations pouvant être reliées à la présence de racines. Ceci s'explique par le fait que le pointé est réalisé manuellement sur des signaux où la première perturbation apparaît clairement. Lorsqu'une mesure est située au delà des intervalles d'incertitudes (sur le pointé et sur la tortuosité) alors on peut accorder une certaine confiance au résultat.

Considérer les vitesses de propagation semblent en théorie une bonne approche étant données les différences significatives observées en laboratoire, la vitesse étant nettement supérieure dans le bois de racine que dans le sol environnant. Cependant ce critère est biaisé par deux facteurs :

- la première source d'erreur est l'erreur d'estimation sur le pointé : les signaux étant bruités, les temps d'arrivés sont incorrects. Aux barres d'erreurs représentées sur les profils de vitesses, il faudrait prendre en compte l'hypothèse de rai rectiligne (sur laquelle repose la méthode RINNTECH) entre la source et le récepteur ;
- la seconde source d'erreur est de considérer que les racines sont rectilignes alors qu'elles ne le sont rarement en réalité.

Ces deux sources d'erreurs s'additionnent et induisent des incertitudes d'amplitude, supérieures aux variations physiques réelles du paramètre vitesse.

- *Paramètres spectraux f_{max} et $A_{f_{max}}$ de l'onde*

Les séries de données représentant l'amplitude et la position des principaux pics spectraux montre une dispersion bien trop importante pour pouvoir distinguer la réponse d'une racine. Nous ne sommes pas parvenus à extraire une information utile, simplement à partir de la détermination de la fréquence maximale et de son amplitude. Il serait intéressant d'utiliser des méthodes permettant de comparer des spectres en considérant l'ensemble des fréquences. Plusieurs méthodes sont possibles dont l'utilisation du traitement en ondelettes. Il est impossible d'interpréter un à un les résultats de la transformée en ondelettes pour chaque signal. La méthode de cross-corrélation des signaux de transformées en ondelettes issus d'angles consécutifs permettrait potentiellement d'identifier des variations angulaires significatives. L'analyse en composante principale peut être une bonne alternative afin de comparer un à un les spectres et d'en déduire qu'elles sont les fréquences pour lesquelles les variations sont significatives et reflètent

un caractère physique correspondant à la présence d'une racine.

étant donnée la variabilité des séries de mesures, la principale difficulté, quel que soit le paramètre, est de définir si une variation brusque (un pic) est causé par une anomalie physique réelle ou bien par une erreur de mesure. Pour cela nous avons besoin de définir un critère pour lequel un pic pourrait correspondre à la présence de racines.

La première condition est d'appliquer un algorithme de détection des maximums locaux respectant la condition que le pic doit être formé par au minimum trois points. Cela évite de considérer des pics correspondant à des valeurs extrêmes dues à une erreur de mesure. Cette première condition respecte bien en terme de résolution une condition physique à savoir qu'une racine de diamètre ≥ 10 cm sera intégrée dans un cône d'angle d'environ 15° . Ceci implique d'avoir un maillage suffisamment petit selon la taille de la cible recherchée. Cette condition se justifie aussi car l'excitation du sol par une source marteau couplée à une plaque n'est pas ponctuelle mais se diffuse dans les trois dimensions. De plus, une racine de gros diamètre influe aussi sur quelques décimètres dans son entourage en jouant sur la compaction du matériaux, et par ses nombreuses racelles et ramifications.

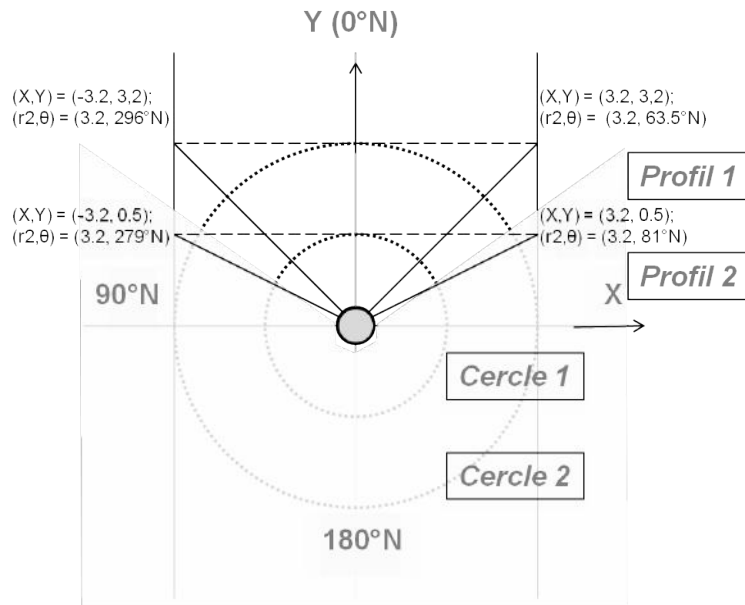
La seconde condition impose de définir deux seuils :

- un seuil minimum, défini par le calcul des incertitudes. Si la mesure est supérieure au seuil, alors elle est significative ;
- un seuil maximum, afin de déterminer si la valeur est extrême. Ceci nécessite une bonne connaissance bibliographique des valeurs absolues que l'on peut considérer comme physiquement acceptable.

iv Comparaison des résultats obtenus avec les méthodes acoustique et électrique

La géométrie d'acquisition circulaire permettant de considérer des trajets source-récepteurs constants quel que soit l'angle imposée par la prospection acoustique ne permet pas de se caler parfaitement sur les profils géoélectriques rectilignes. Cependant en considérant des racines rectilignes et en projetant les données obtenues sur les différents cercles d'acquisition vers un profil géoélectrique, une comparaison peut être réalisée. Comme le montre la figure 7.25, le calage consiste à passer des coordonnées cylindriques vers les coordonnées cartésiennes suivi d'une projection. Le calage des données implique aussi d'extraire un profil de la section 2D obtenu avec la tomographie électrique à un profondeur donnée (pour une distance source récepteur). Celui-ci a été choisi arbitrairement à 0,2 m de profondeur, car la majorité des anomalies observées sur les sections géoélectriques sont situées à cette profondeur.

FIGURE 7.25 – Calage des données acoustiques (cercles) avec les données de profils électriques. Transformation par projection des coordonnées cartésiennes (x,y) vers des coordonnées cylindriques $((r,\theta))$



Nous ne présentons ci-dessous que les résultats de la projection du cercle de rayon 3 m sur les profils géoélectriques situés à 3,2 m du tronc, plus réaliste que la projection du cercle de rayon 1,5 m. Nous avons établi précédemment que la vitesse est le paramètre le plus représentatif. La comparaison est donc réalisée entre la vitesse de propagation de l'onde acoustique et à la fois l'amplitude de la résistivité (figure 7.26) et la chargeabilité électrique (figure 7.27).

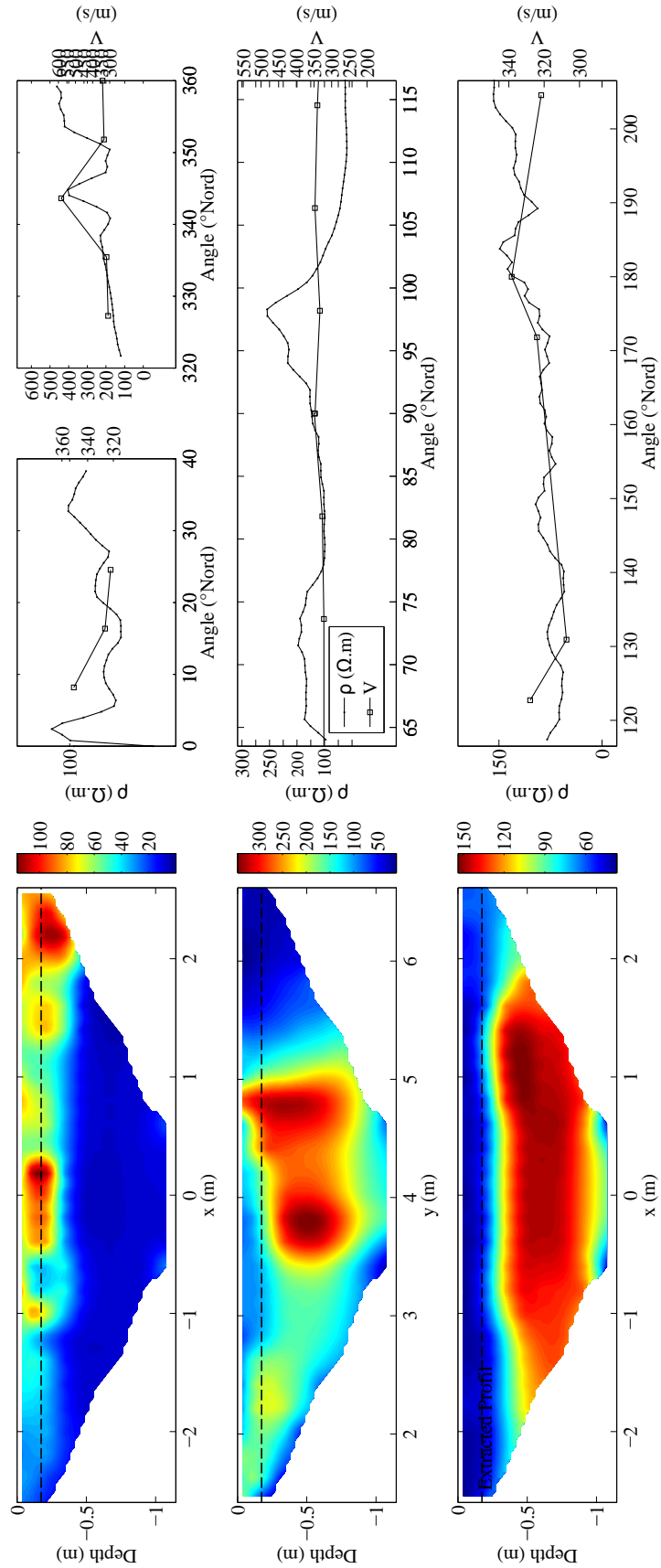


FIGURE 7.26 – Comparaison des profils angulaires obtenus de l'amplitude de la résistivité électrique (ρ en $\Omega.m$) avec la vitesse de propagation de l'onde acoustique (V en m/s) ; l'échelle de l'axe des ordonnées est réglée afin d'obtenir les valeurs encadrées à \pm deux fois l'écart type de la série de données

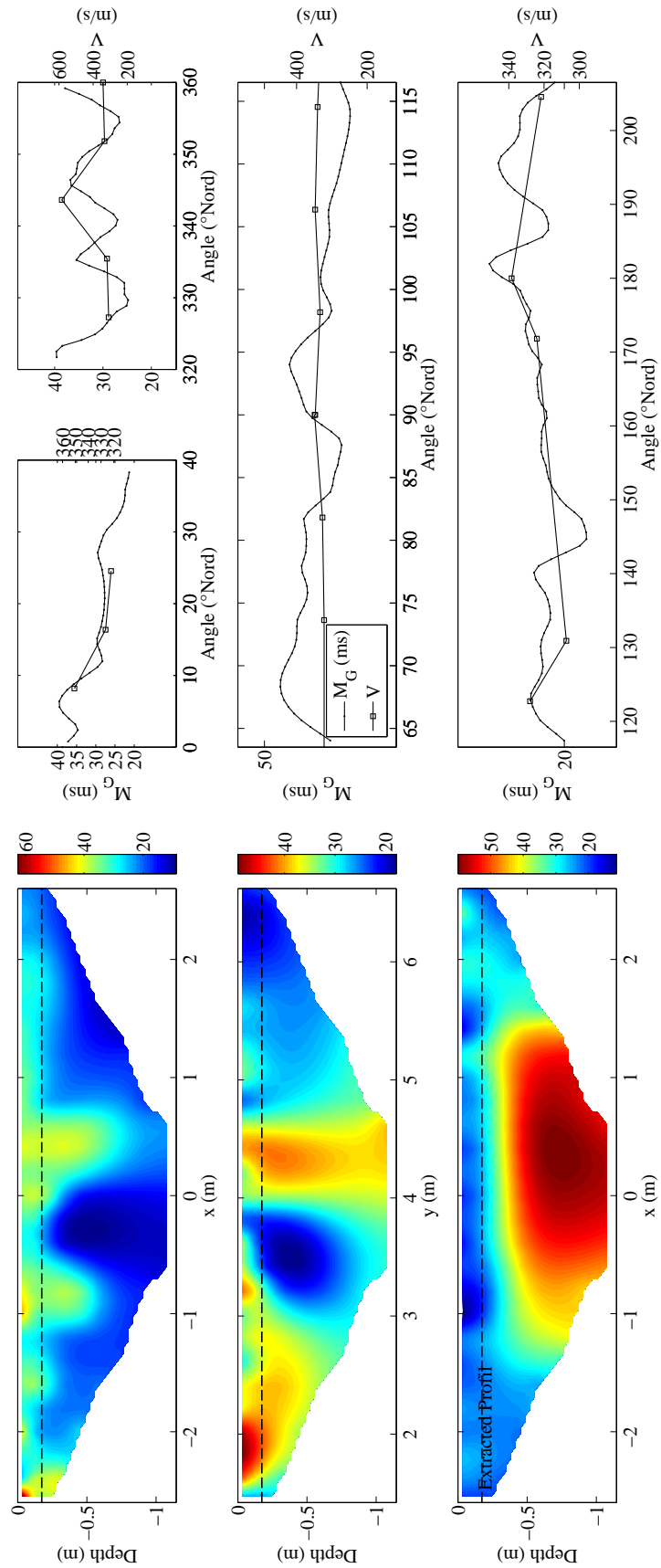


FIGURE 7.27 – Comparaison des profils angulaires obtenus de la chargeabilité totale (M_T en $\Omega.m$) avec la vitesse de propagation de l'onde acoustique (V en m/s); l'échelle de l'axe des ordonnées est réglée afin d'obtenir les valeurs encadrées à \pm deux fois l'écart type de la série de données

v Propositions d'interprétations

En combinant l'acquisition électrique et acoustique mais aussi la connaissance bibliographique et l'observation visuelle, nous souhaitons interpréter conjointement les résultats afin d'en déduire le volume et la structure des systèmes racinaires, mais aussi d'identifier l'environnement de croissance (le type de sol).

Rappelons tout d'abord que nous avons, au cours de l'étude menée sur le site du Mas Beaumont, caractérisé deux types d'anomalies :

- les anomalies longitudinales (étendues), de longueur supérieure à 60 cm (ou 30° d'angle) qui s'expliquent généralement par des différences de constitution de sols ;
- les anomalies ponctuelles (inférieure à 60 cm) qui physiquement pourrait s'apparenter à des racines. Les anomalies observées se manifestent par des contrastes racine/sol de faibles amplitudes, aussi bien de nature électrique ou de densité (acoustique). Il convient donc d'être prudent quant à l'interprétation de la nature des anomalies identifiées.

Afin de donner plus de sens à l'interprétation des données et à la nature des anomalies observées, nous proposons d'analyser conjointement les deux approches.

Analyse conjointe

Les variations étendues sont bien mises en avant en prospection électrique. Ainsi, nous observons une baisse de la résistivité et de la chargeabilité dans la zone correspondant à des dépôts de matière organique (figure 7.5). Cette zone se manifeste aussi clairement par une atténuation en amplitude de l'onde acoustique. Ceci provient de sa faible densité liée à sa nature très hétérogène et sa composition. Par exemple, d'après les figures 7.26 et 7.27 sur le profil en contrebas de l'arbre (de 120°N à 200°N, figure du bas), la vitesse de propagation semble avoir un comportement proche de la chargeabilité et de la résistivité. Dans ce cas, les variations observées sont faibles : 20 m/s sur V , 10 ms sur M_T et environ 50 Ω m sur ρ .

Les variations brusques (de l'ordre de 20° d'angle ou de 20 cm de distance rectiligne), représentent le plus probablement des racines superficielles principales. Dans le cas de variations brusques, l'approche acoustique n'explique pas toutes les anomalies observées par la méthode électrique. Par exemple, l'anomalie située à 345°N se manifeste par une augmentation significative de la vitesse de 200 m/s, et une augmentation de ρ de 40 Ω m. En revanche l'anomalie située à 98°N, correspondant à la racine détectée à la base du tronc et n'est visible que par méthode géoélectrique. Ceci peut s'expliquer par le fait que cette anomalie se situe dans la rupture de pente entre deux terrains de natures différentes. De plus, cette anomalie superficielle à la base du tronc semble croître en profondeur avec la distance (centrée approximativement à 50 cm de profondeur) et n'est pas forcément visible par la méthode acoustique (d'où l'intérêt d'une prospection acoustique à différentes profondeurs).

Comparaison avec les données expertes

Une groupe d'experts s'est rendu sur la digue afin d'évaluer le critère d'état de la perméabilité du remblai vis à vis de la végétation. Nous comparons, les résultats de nos interprétations géophysiques avec ceux des données expertes sur la base de trois indicateurs d'états explicités ci-dessous. Ces indicateurs sont issus du modèle fonctionnel d'évaluation sur les digues produit par Bambara et al. (2014) (figure 7.28). Pour les indicateurs IE1.2, IE1.6 et IE1.7, les données géophysiques sont en accord avec les données expertes.

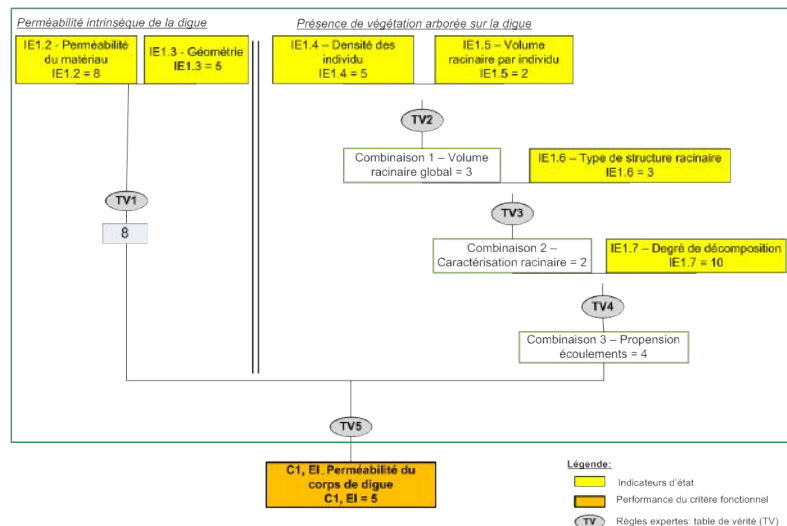
- **IE1.2**, concerne la perméabilité du remblai qui est estimée à 10^{-6} m/s par le groupe d'experts. Cette perméabilité correspond à des matériaux de type limoneux argileux.

Nous avons montré que la digue était bien homogène dans son ensemble et par comparaison avec les amplitudes des résistivités issues de la littérature, le matériau le composant est de type limoneux. Ce matériau possède bien une perméabilité de l'ordre de 1×10^{-6} m/s.

- **IE1.6** : par l'observation visuelle, le groupe d'experts a estimé que la **structure des systèmes racinaires** est de type traçante ou mixte avec une extension dans les parties 3 (corps de digue) et 4 (fondation). D'après les données géophysiques, des anomalies superficielles ont bien été observées au niveau de l'entrée du corps de digue. Cependant par comparaison avec le profil le plus proche de l'arbre, la densité racinaire est bien moins élevée lorsque l'on s'éloigne du tronc vers la digue. S'il existe des racines à l'entrée du corps de digue, celles ci semblent être de petit diamètre. D'autre part, il n'est pas exclu que de nombreuses racines se trouvent sous la souche si elles ne rencontrent pas d'obstacles majeurs et en particulier une nappe peu profonde ou des matériaux peu favorables. Les données géophysiques s'accordent avec les données expertes pour dire que le risque d'intrusion de racine à travers l'ouvrage est faible.
- **IE1.7** : le **degré de décomposition de l'arbre** a été défini comme nul puisque le bois est considéré comme sain par les experts. L'étude géophysique de la propagation du signal acoustique à travers le tronc (en annexe) permet d'obtenir une estimation grossière de la vitesse de propagation dans le tronc. En moyenne (suivant les différents plans de mesures), la vitesse de propagation est approximativement de 2200 m/s. D'après nos essais de laboratoire et la littérature existante (Socco et al., 2004; Nicolotti et al., 2003; Martinis et al., 2004), cette vitesse est de l'ordre de grandeur de la vitesse observée dans un bois sain de chêne.



(a) Application et calibration in-situ (Site du Mas Beaumont) des modèles d'évaluation de la performance par une population d'experts



(b) Résultats de l'application des modèles d'évaluation de la performance par une population d'experts - Diagramme d'agrégation des indicateurs d'état pour l'évaluation du critère fonctionnel perméabilité du corps de digue formé à l'aide de tables de vérité (règles conditionnelles définies par les experts)

FIGURE 7.28 – Intégration des données géophysiques dans le système d'évaluation de la performance des digues en remblai

7.5.b Grand Rhône rive droite

Les prospections sur ce site d'étude ont été réalisées durant la journée du jeudi 19 février 2015. Comme pour le site d'étude n°1, de nombreuses précipitations les jours précédents ont eu lieu ce qui a rendu le sol humide (environ 30% de teneur en eau volumique en surface). L'évolution de la teneur en eau le long du profil transverse montre des variations faibles en fonction de la position sur la digue, en moyenne 22%.

i Évolution spatiale basse résolution

Nous adoptons une stratégie d'acquisition identique à celle utilisée pour le site du Mas Beaumont. Dans un premier temps, des profils longs de tomographie électrique afin d'évaluer l'homogénéité de la digue dans son ensemble. La section représentée sur la figure 7.29 est issue d'un profil de 32 électrodes disposées de façon longitudinale en crête de digue.

Ce profil intègre deux chênes à différentes positions suivant la direction de l'axe X correspondant à l'orientation de la digue. Nous les distinguons sur l'amplitude des anomalies de résistivité au niveau des deux premiers mètres de profondeur. Les zones hypothétiques de développements racinaires à l'aplomb des arbres se manifestent par des résistivités plus fortes de l'ordre de $400 \Omega \cdot m$. Au-delà des deux premiers mètres et aux abscisses comprises entre $X = [0 \ 15]$ m où aucun arbre n'est recensé, le terrain semble homogène de résistivité $150 \Omega \cdot m$. Par comparaison le terme de chargeabilité semble aussi être affecté par la présence d'arbres en surface, ce qui se manifeste par des anomalies de l'ordre de 20 ms. Une anomalie de chargeabilité est visible à grande profondeur à partir de 5 m, ce qui ne peut vraisemblablement pas être expliqué par la présence de racines mais peut-être par la limite de la fondation de la digue. Cependant cette augmentation n'est pas forcément avérée car on ne dispose, à cette profondeur, de trop peu de points de mesures, d'une sensibilité très faible. Le bruit de mesures est élevé (à ces espacements) et par conséquent l'inversion n'est pas fiable aussi bas dans la coupe.

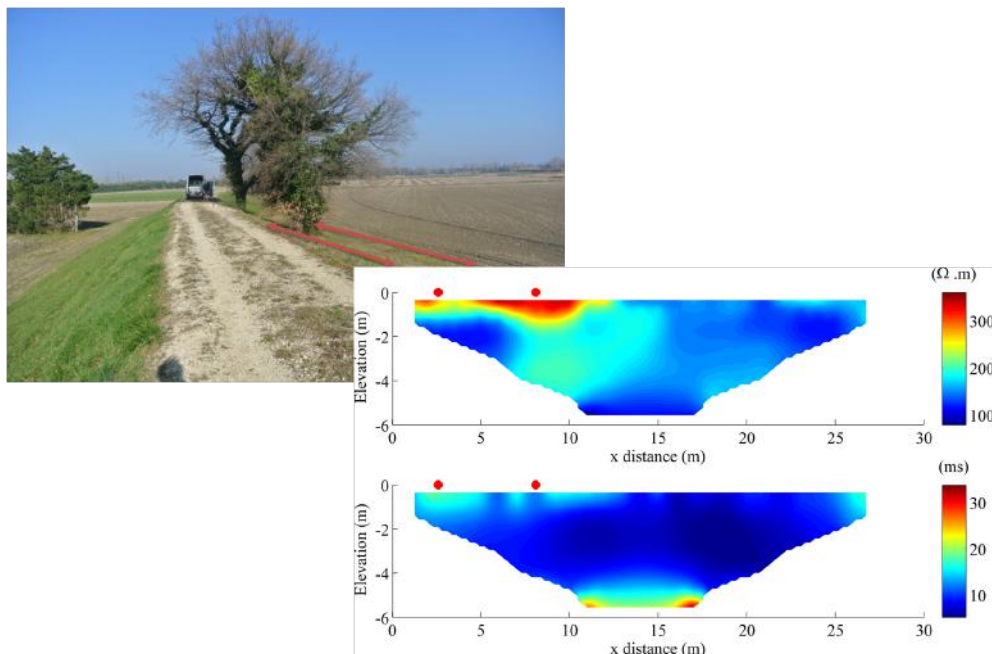
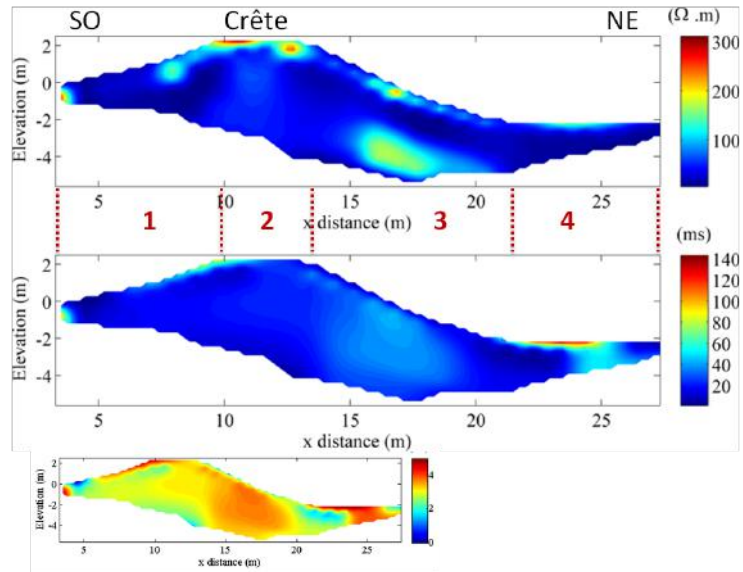


FIGURE 7.29 – Section n°1 inversée (profil en crête); espacement inter-électrodes =1 m ; profil de 3,2 m réalisé en Wenner-Schlumberger. Les points rouges représentent la position des arbres sur le profil. En haut : amplitude de la résistivité électrique/ En bas : amplitude la chargeabilité totale

La seconde section présentée ci-dessous (figure 7.30) représente un profil coupant la digue de façon transversale. Des électrodes ont été placées en déport de part et d'autre du corps de digue pour en imager la totalité (figure 7.11).

FIGURE 7.30 – Section n°2 inversée (profil transversal); espacement inter-électrodes = 0.8m; profil réalisé en Wenner-Schlumberger. Les points rouges représentent la position des arbres sur le profil. En haut : amplitude de la résistivité électrique/ En bas : amplitude la chargeabilité totale puis en échelle logarithmique de base 10.



Nous distinguons quatre zones :

- le parement côté amont (1, $x = [4 \ 10]$) où sont implantés deux arbres respectivement à 0.55 et 2 m d'élévation ;
- la crête de digue (2, $x = [10 \ 12]$) ;
- le parement côté vallée (3, zone protégée, $x = [10 \ 21]$) ;
- la fondation côté vallée (4).

En première analyse et quelle que soit la zone d'étude, la digue semble homogène en profondeur dans l'ensemble du corps de digue. Une faible anomalie de résistivité est identifiable en profondeur dans la zone du parement côté val(3). Les variations les plus significatives des propriétés électriques se situent en surface essentiellement dans le premier mètre. C'est le cas par exemple de la zone 4 où la route en matériaux fins et très compactés crée une anomalie à la fois de résistivité et de chargeabilité. D'autre part, la crête rendue carrossable est, par conséquent formée d'un matériau grossier peu conducteur et très compacté, qui se distingue par une anomalie de résistivité positive d'amplitude $300 \Omega \cdot m$. En revanche, elle est bien moins visible sur le terme de chargeabilité. Cette anomalie s'étend côté fleuve où se situent les arbres.

Bien que le profil ne soit pas suffisamment de haute résolution pour intégrer individuellement une racine, les termes d'amplitude de la résistivité et de la chargeabilité sont affectés par la présence des parties souterraines des arbres. Ainsi il est possible de distinguer des effets globaux de présence de racines particulièrement sur la proche surface. Par comparaison des deux parements (côté fleuve et val), nous observons que la chargeabilité est plus grande côté fleuve que côté val, ce qui pourrait s'expliquer par la présence d'arbres côté fleuve.

ii Évolution spatiale haute résolution

Afin de mieux appréhender la géométrie des développements racinaires, des profils avec un maillage plus fin (0,2 m de distance inter-électrodes) sont réalisés à proximité des arbres situés côté fleuve.

Nous observons des anomalies positives de résistivités de l'ordre de $300 \Omega \cdot m$ dans les 80 premiers centimètres de profondeurs (figure 7.31). En tenant compte de la forme, de la taille, de l'amplitude ainsi que de la profondeur de ces anomalies, tout semble indiquer la présence de racines superficielles de gros diamètres. En revanche, à partir d'une échelle linéaire de la chargeabilité, les anomalies créées dans cette tranche de sol ne se manifestent pas clairement. Au delà du premier mètre de profondeur, le terrain semble être homogène sur le terme d'amplitude mais pas sur la chargeabilité qui augmente. D'après la géométrie de la digue, ceci est probablement lié au fait que nous sommes à l'interface entre la corps de digue et la fondation. Comme nous l'avons déjà remarqué sur le profil long en crête (figure 7.29), la fondation se charge plus que le corps de digue.

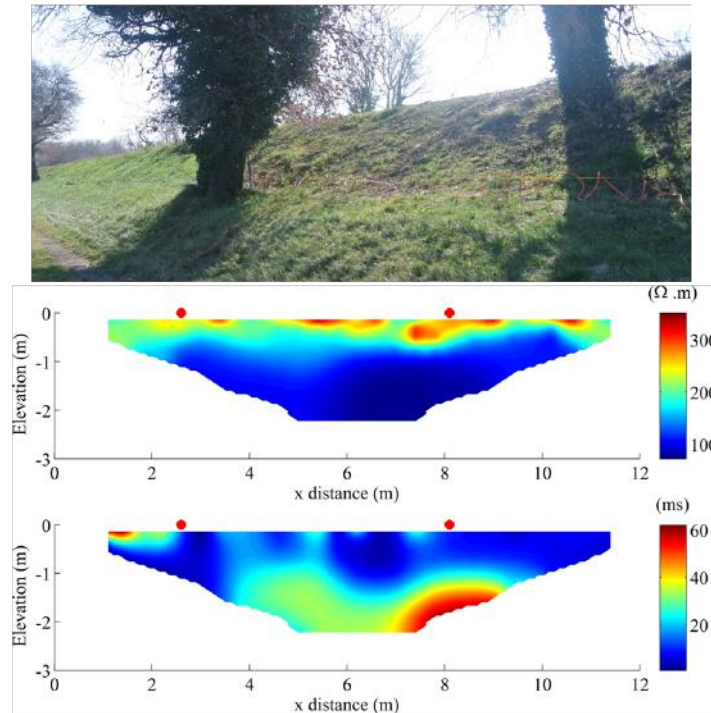


FIGURE 7.31 – Section n°3 inversée (profil en crête); espacement inter-électrodes = $0,4 \text{ m}$; profil de $3,2 \text{ m}$ réalisé en Wenner-Schlumberger. Les points rouges représentent la position des arbres sur le profil. En haut : amplitude de la résistivité électrique/ En bas : amplitude la chargeabilité totale

Influence du temps d'injection

Afin d'illustrer le compromis entre le temps d'acquisition, contrôlé en majorité par le temps d'injection (et le temps de mesure de la décroissance du potentiel) et la qualité du contraste racine/sol, nous proposons d'étudier les différences pour des injections respectivement de 1 et $0,1 \text{ s}$ (figure 7.32). A noter que le temps de décroissance intégré pour la mesure de la chargeabilité totale reste identique égal à $6,3 \text{ s}$.

Les valeurs de chargeabilité sont exprimées en les normalisant par les valeurs de résistivité du milieu, on parle alors de chargeabilité normalisée. Cette approche permet de s'affranchir des variations de résistivité du milieu et de manipuler une grandeur qui représente exclusivement l'amplitude de la polarisation du milieu (Slater and Lesmes, 2002), et qui est donc particulièrement indiquée pour comparer des chargeabilités.

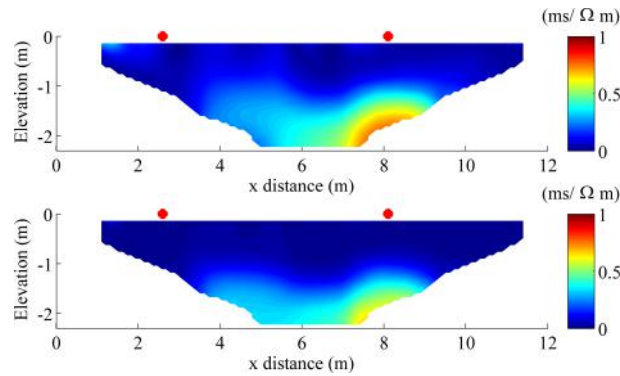


FIGURE 7.32 – Profils de chargeabilité normalisés obtenus pour différentes durées d’injection du courant : 1 s (en haut) et 0,1 s (en bas) ; profil de 3,2 m réalisé en Wenner-Schlumberger

Majoritairement, la chargeabilité normalisée totale sur l’ensemble des points constituant la section est plus élevée lorsque le temps d’injection est long. En particulier pour la couche la plus superficielle (inférieur à 50 cm), la réponse est plus forte lorsque nous injectons sur une durée de 1 s. En comparant avec le terme d’amplitude de la résistivité (figure 7.33), la concordance entre la section de résistivité et celle de chargeabilité semble augmenter avec le temps d’injection. Par conséquent, le choix de travailler avec une durée d’injection de 1 s plutôt que 0,1 s semble pertinent pour mieux éclairer les racines superficielles, mais induit aussi une réponse plus forte du sol par recouvrement des effets de polarisation.

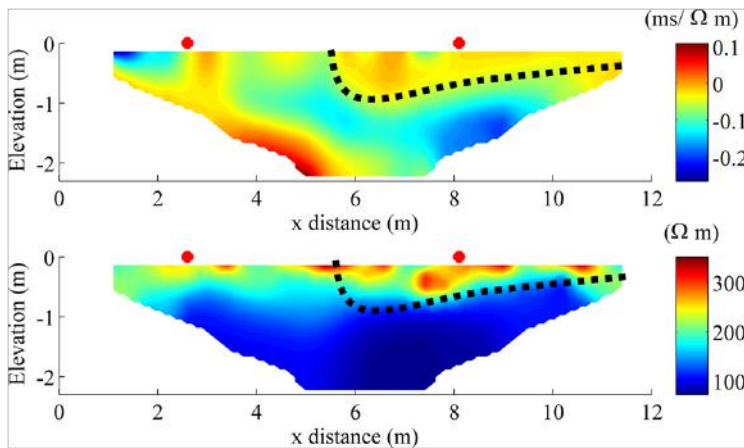


FIGURE 7.33 – Comparaison de la section de résistivité (en bas) avec la section des différences de chargeabilité entre $TON = 1\text{ s} - TON = 0,1\text{ s}$ (en haut)

Durée de l’injection (s)	Durée de la mesure de potentiel (s)	Durée de l’acquisition (HH :MM :SS)
1	6,3	01 : 44 : 57
0,1	6,3	01 : 27 : 30

Tableau 7.4 – Durée de l’acquisition pour différents temps d’injections

D’après le tableau 7.4 et d’un point de vue opérationnel, le temps d’acquisition pour un profil composé de 32 électrodes (172 points de mesures) est relativement long (1h30 à 1h45). Nous avons cependant pris le parti de garder un temps de mesure de la décroissance du potentiel bien supérieur (6,3 s) au temps d’injection (1 s et 0,1 s) afin d’éviter les effets cumulatifs. Ces effets interviennent lorsque le milieu n’a pas eu suffisamment le temps pour se décharger complètement (autrement dit si la constante de temps caractéristique du milieu est grande) alors les effets s’accumulent d’une mesure à une autre.

iii Synthèse des prospections menées sur le site de Beaujeu (Grand Rhône rive droite)

L'étude menée en conditions réelles, propose une évaluation de la croissance des systèmes racinaires sur un tronçon de digue réputé homogène avec des arbres placés à différentes positions sur le parement côté fleuve. Tout comme pour l'étude sur le site du Mas Beaumont (Petit Rhône rive gauche), notre stratégie d'acquisition en deux temps s'est avérée efficace. Les profils longs en crête et transversaux ont mis en évidence l'extension et la profondeur d'enracinement des arbres. Ces anomalies sont observées à la fois sur le terme d'amplitude de la résistivité et sur la chargeabilité. L'information issue des profils hautes résolutions conforte le fait que l'enracinement est superficiel sans pour autant définir la géométrie exacte des systèmes racinaires pour laquelle plus de profils seraient nécessaires. Le terme de chargeabilité reste néanmoins plus complexe à interpréter. L'amplitude des anomalies est moins importante dans la zone hypothétique des racines et d'autres anomalies apparaissent telles que la mise en évidence de la fondation. Enfin, il semblerait que travailler avec un temps d'injection de 1 s soit un minimum afin d'obtenir une réponse des racines

7.6 Conclusions et limites de l'application des méthodes de tomographies aux digues

i Comparaison avec les essais de laboratoire et en conditions semi-contrôlées

Le premier objectif de cette campagne de terrain était de confronter les résultats obtenus en conditions réelles avec les résultats obtenus en laboratoire et en conditions semi-contrôlées.

Amplitude de la résistivité

Comme pour les essais en laboratoire et en conditions contrôlées, sur les deux sites d'étude, les zones de développement racinaire hypothétiques sont apparues systématiquement sous forme d'une anomalie positive de l'amplitude de la résistivité dans le sol encaissant (limono-argileux) (approximativement $400 \Omega\text{m}$ soit $+300 \Omega\text{m}/\text{sol}$). Cette valeur est inférieure à celle obtenue en laboratoire sur des échantillons (de 800 à $1000 \Omega\text{m}$), et supérieure à celles observées en conditions semi-contrôlées ($\simeq 200 \Omega\text{m}$). Les différences d'amplitude observées entre les différents essais (laboratoire, semi-contrôlés, digue) semblent pouvoir être attribuées à la taille des racines détectées qui est directement proportionnelle à la taille de l'arbre. Plus la racine est supposée de gros diamètre plus la résistivité est élevée car l'épaisseur de l'écorce et du duramen, tout deux isolants, augmentent.

Polarisation (Phase ou Chargeabilité)

Excepté pour les essais en condition contrôlée où le sol avait été remanié et l'arbre placé en situation de stress-hydrique, pour des anomalies de faibles profondeurs, les zones de développement racinaire hypothétiques sont apparues systématiquement sous forme d'une anomalie positive de phase de la conductivité (PPS) ou de chargeabilité (PPT) dans le sol encaissant (limono-argileux). Les amplitudes ne peuvent pas être comparées facilement car les durées d'injection sont adaptées et varient suivant les essais.

Vitesse de propagation

Les essais conduits en laboratoire et en conditions semi-contrôlées ont montré que la vitesse de propagation était le meilleur critère pour l'interprétation de la détection et que celle-ci était plus élevée lorsque la propagation a lieu dans une racine. Ce constat semble être identique lors

de l'étude en conditions réelles, puisque les anomalies de vitesse correspondant à la propagation hypothétique le long d'une racine apparaissent positives par rapport au sol encaissant.

ii Tomographie électrique

A l'aide de la méthode géoélectrique de polarisation provoquée, les résultats sont plutôt satisfaisants sur les profils en longs pour estimer la masse racinaire ainsi que la profondeur maximale d'enracinement. En effet dans un contexte de digues homogènes construites à partir de matériaux fins de type limoneux, les enracinements superficiels se manifestent bien par des anomalies positives d'amplitude de la résistivité et positive de chargeabilité relativement au sol encaissant.

Néanmoins la principale difficulté est d'obtenir une information localisée sur la présence de racines en profondeur. La résolution d'une mesure diminue avec la profondeur d'investigation, particulièrement sur le terme de chargeabilité. Des tests de répétabilité lors d'expériences en milieu semi-contrôlés ont été effectués et montrent logiquement que le terme de chargeabilité est bien moins répétable que l'amplitude de la résistivité. La chargeabilité est aussi affectée par d'autres paramètres du milieu tels que la teneur en eau ou bien la température. C'est pourquoi lorsque les anomalies sont plus faibles (par exemples créées par des enracinements plus profonds ou des densités racinaires moins fortes), l'amplitude du terme de chargeabilité est contrôlée par le sol. Par conséquent, il semble quasiment impossible de distinguer une racine isolée plongeante au-delà du premier mètre avec cette technique.

Les profils obtenus avec des résolutions de l'ordre de la taille de l'anomalie recherchée, soit une racine primaire d'au moins 10 cm de diamètre, permettent d'imager une section sur ce premier mètre de profondeur. On constate des variations des deux quantités physiques mesurées, résistivité et chargeabilité, mais il est plus compliqué d'attribuer les variations observées à la présence de racines. A noter que dans ce cas de profils "hautes résolutions", la corrélation spatiale entre la résistivité et la chargeabilité n'est plus systématiquement évidente.

D'autres logiciels d'inversions seront prochainement testés pour analyser les données. En outre, l'inversion des données sera réalisée à l'aide du logiciel Aarhus2dInv©, qui tient compte des chargeabilités partielles (à différents temps). Cela permettra de retrouver les quatre paramètres, dit de Cole-Cole décrivant les caractéristiques du sol, soit deux fois plus qu'avec le logiciel RES2DINV©, puis de les comparer à ceux obtenus en laboratoire.

iii Tomographie acoustique

La méthode de tomographie acoustique telle que nous l'avons pratiquée, de part sa méthodologie d'acquisition, ne permet d'obtenir qu'une information qualitative sur la présence de racines peu profondes situées au maximum dans le premier mètre. Elle est par conséquent à la fois complémentaire mais aussi redondante à l'approche électrique :

- complémentaire car les variations observées sont gouvernées non plus par des propriétés d'impédance électrique du sol mais par les propriétés d'impédance acoustique ;
- redondante car elle ne permet d'obtenir qu'une information superficielle, tout comme nos premières conclusions semblent l'indiquer pour la méthode électrique.

Malgré les conditions difficiles d'acquisitions qui sont sources d'erreurs, tels que la topographie et les différentes natures des sols (humus localisé), nous avons pu tirer quelques enseignements intéressants. La représentation des barres d'erreurs à la fois sur le calcul de la vitesse mais aussi sur l'hypothèse de tortuosité permet d'estimer si les variations observées

sont bien significatives. Pour la détection de racines, le terme de vitesse reste compliqué à interpréter car il est difficile de pointer correctement l'arrivée de l'onde. Il est donc nécessaire de sélectionner des signaux ayant un rapport signal/bruit suffisamment grand afin de ne pas commettre de pointés aberrants. Après cela, la vitesse semble être le paramètre le plus pertinent en termes de contraste et de régularité de la série de données.

Le terme d'amplitude a montré une bonne sensibilité aux différences de lithologie du terrain, mais du fait de la variabilité de la série de données il n'est pas aisé de distinguer un pic provenant de la présence de racine d'une valeur aberrante.

Quant à l'étude des propriétés spectrales, les séries de données représentant l'amplitude et la position des principaux pics spectraux montrent une dispersion bien trop importante pour pouvoir distinguer la réponse d'une racine. Bien que d'autres études appliquent cette méthodologie avec succès (Royal et al., 2011; Muggleton et al., 2014; Dutta et al., 2013), nous ne sommes pas parvenus à extraire une information utile, simplement à partir de la détermination de la fréquence maximale et son amplitude, le milieu étant plus complexe à analyser. Il serait intéressant d'utiliser des méthodes permettant de comparer des spectres en considérant l'ensemble des fréquences tels que l'analyse en ondelettes (cross-corrélation) ou l'analyse en composante principale.

iv Complémentarité des méthodes

Dans cette étude, la complémentarité entre les deux méthodes n'a pas pu être exploitée de façon optimale. La géométrie d'acquisition circulaire, permettant de considérer des trajets source-récepteurs constants quel que soit l'angle, imposée par la prospection acoustique ne permet pas de parfaitement caler les profils géo-électriques. Cependant, le départ d'une racine principale observée visuellement (site du Mas Beaumont) semble avoir pu être identifiée à partir des deux méthodes (sous l'hypothèse d'une racine rectiligne). Pour mieux corrélérer les deux méthodes il est possible d'envisager une acquisition 3D sous forme de cercles concentriques en imagerie électrique.

v Synthèse et perspectives

Une perspective de déterrage des racines superficielles est en cours afin de valider les résultats de détection obtenus pour les racines principales des arbres instigués.

De façon générale pour conclure, les comportements dangereux semblent pouvoir être évalués lorsqu'il s'agit de racines traçantes peu profondes. Dans ce cas il n'est pas inconcevable, en terme de résolution, de pouvoir déterminer la direction et l'extension des racines principales. Un arbre positionné en pied de digue constitue une situation favorable à la détection et à l'évaluation des comportements de développement à risque puisque, aucune topographie n'est à prendre en compte, et l'étude du premier mètre suffit à évaluer l'intrusion ou non de racine dans le corps de la digue. A ce stade de développement, certains indicateurs d'états peuvent être remplis avec précautions tels que le volume du système racinaire. D'autres semblent pour le moment prématurés tels que énoncer la structure du système racinaire particulièrement pour des systèmes mixtes ou tels que des racines principales plongeant en profondeur.

Cette expérimentation ouvre des perspectives intéressantes de l'application des méthodes géophysiques pour l'auscultation des ouvrages hydrauliques en remblai. Une des limites principales est le temps d'acquisition, puisque l'on compte en moyenne seulement quatre profils

par jour. Les évolutions récentes et à venir en lien avec le développement d'instruments plus performants (exemple de la FullWave qui enregistre la totalité de l'onde sur tout le créneau d'injections), mais aussi en terme vitesse de calculs peuvent venir lever cette limitation tout en enrichissant le signal. D'autre part, connaissant les limites de notre approche de tomographie électrique, à savoir une perte d'informations interprétables au-delà du mètre de profondeur, il sera intéressant d'optimiser de nouveaux protocoles d'acquisition afin de garder uniquement l'information utile.

Conclusion et perspectives

La compréhension des développements racinaires revêt une grande importance pour diverses communautés scientifiques en biologistes, d'agronomes et de chercheurs en génie mécanique. En dépit de l'intérêt qu'on leur porte jusqu'à maintenant, notre connaissance sur leurs structures est limitée, principalement à cause de l'inadéquation des méthodes disponibles, des protocoles et évaluations mis en place. Les résultats présentés au cours de cette thèse permettent d'enrichir notre connaissance sur la localisation des systèmes racinaires incluant implicitement leur développement et croissance. Ces résultats sont à destination première de la communauté du génie-civil, mais peuvent aussi servir à d'autres communautés intéressées par des techniques d'imagerie des zones racinaires.

A ce jour, les connaissances acquises sur le comportement des développements racinaires sur les ouvrages en remblai sont majoritairement issues d'études destructives et ne permettent pas de répondre de manière exhaustive et sans incertitudes à la problématique d'auscultation des ouvrages hydrauliques. C'est pourquoi l'objectif du travail de thèse était de développer et d'adapter des méthodes géophysiques non destructives, permettant de cartographier les systèmes racinaires dans le remblai de la digue et ainsi d'appréhender les développements racinaires à risque vis-à-vis des phénomènes d'érosion. Nous disposons pour point de départ des éléments bibliographiques montrant le potentiel des méthodes d'imagerie par tomographie électrique et acoustique dans la localisation et la détection des systèmes racinaires.

Bilan et apports des travaux réalisés

Développement d'une base théorique

Chacune des deux méthodes (tomographie acoustique et électrique) consiste à localiser une anomalie dans un sous-sol en mesurant un champ physique résultant d'une source d'excitation naturelle ou provoquée. Les phénomènes observés lors de la mesure en surface sont dictés par des processus à des échelles microscopiques, parfois en interaction avec l'environnement. La compréhension des processus à ces échelles permet de déterminer s'il est possible, et comment, d'effectuer une bonne mesure afin de localiser l'anomalie racinaire recherchée. En ce sens pour les deux approches électrique et acoustique, nos efforts se sont d'abord portés sur l'identification de l'origine des signaux. Puis rapidement en se rendant compte que les sources naturelles sont de trop faible amplitude pour localiser les racines principales du système racinaire, la recherche s'est orientée sur les caractéristiques d'une source provoquée permettant d'induire la meilleure réponse du système, c'est-à-dire le meilleur contraste racine/sol.

Polarisation de membranes - résolution - facteur de teneur en eau

La première contribution porte sur la confrontation de la théorie de la polarisation de membrane avec les résultats des mesures intrinsèques sur les échantillons racinaires et de sol.

Biologiquement, le bois, étant une structure poreuse, provoque des effets de polarisation lorsque des ions y circulent. Des dispositifs simples (tels que l'utilisation d'électrodes ECG) malgré les biais qu'ils induisent, ont tout de même permis de retrouver des résultats en adéquation avec la théorie de polarisation de membrane. Des tests en laboratoire ont permis de déterminer l'influence de la fréquence (PPS) ou du temps (PPT) d'injection sur l'amplitude

de la polarisation. Les effets de polarisation observés sur des échantillons racinaires sont bien contenus dans la gamme de fréquence correspondant à des phénomènes de polarisation de membranes, à savoir que le maximum de la phase de la conductivité est contenue, d'après nos expériences, dans la gamme de fréquence de 1 à 10 Hz. De plus, les données issues des mesures PPT sur des échantillons de racines et de sol (limoneux) ont pu être inversées correctement en considérant le modèle semi-empirique de Cole-Cole, construit notamment pour expliquer les phénomènes associés à la polarisation de membrane.

Identifier et valider l'origine principale de la polarisation a permis d'affirmer, dans un premier temps qu'il est possible d'obtenir une signature spectrale caractéristique d'une racine, mais aussi, dans un second temps, que la réponse induite par celle-ci est potentiellement de plus forte amplitude que celle du sol. Sur l'analyse intrinsèque (directe sur l'échantillon) des échantillons, cette affirmation s'est révélée exacte.

Les expériences menées en laboratoire ne se sont pas limitées à vérifier la concordance avec la théorie de la polarisation de membrane. La seconde contribution était d'améliorer notre connaissance sur les paramètres influençant la mesure, dans le cadre de l'approche de polarisation provoquée à la fois spectrale et temporelle. L'utilisation de la PPT pour l'étude en laboratoire est très rarement utilisée ; elle est donc en ce point originale et innovante.

- la première question est celle de la résolution que l'on peut espérer, c'est-à-dire la proportion de racine par rapport à celle de sol pour laquelle l'identification de la signature associée à la racine est encore possible. Bien que les effets de polarisation intrinsèque soient de plus grande amplitude sur les racines lorsque celles-ci sont enterrées, les effets sont moyennés. Les expériences menées sur différentes tailles d'échantillons racinaires ont logiquement montré, qu'à partir d'une trop petite proportion de racine, il n'est plus possible de distinguer la signature de la racine quelle que soit la fréquence, et cela d'autant plus que le temps d'injection est élevé ;
- la seconde question s'intéressait au poids de la teneur en eau. Deux conclusions y sont formulées :(i) les digues à charges non permanentes (constituées de matériaux limoneux), la plupart du temps sèches, semblent être des conditions favorables à la détection de racines ligneuses. Le maximum de différence de polarisation entre le sol et la racine est observé pour de faibles teneurs en eau de sol. Cette conclusion est validée par la suite lors des essais sur un cas réel. (ii) le monitoring de la dynamique d'absorption d'eau constitue un indice pertinent pour la localisation des zones d'absorption préférentielle situées à proximité des racines principales par la méthode PP, alors que la majorité des études se limitent à la tomographie de résistivité classique ;
- une troisième question, traitée parallèlement, portait sur l'étude des avantages et inconvénients de la mise en place des approches de PPS ou de PPT in-situ en tenant compte de l'efficacité de chacune et de leurs contraintes de mise en place. A ce stade, les deux approches montrent une aptitude pour leurs mises en place in-situ. Cependant, les résultats obtenus avec la méthode de PPS sont plus riches car l'ensemble du spectre est directement accessible et plus robuste car la répétabilité est meilleure.

La propagation d'ondes acoustiques est régie par un ensemble d'équations d'ondes. Leurs solutions permettent de mettre en évidence plusieurs natures de propagation. Dans chacun des cas, certaines quantités physiques décrivent ces phénomènes. En acoustique, on sait mesurer la vitesse de propagation de l'onde, ainsi que l'amplitude du signal. D'un point de vue géométrique, lors de la propagation d'une onde, il se produit dans un milieu hétérogène des phénomènes de réflexion et de réfraction à chaque interface entre des milieux d'impédances acoustiques différentes.

La première contribution du travail portant sur l'imagerie acoustique est de déterminer dans quelle mesure les hypothèses découlant de la méthodologie adoptée et sur lesquelles la détection reposent sont valides :

- le choix de la source d'excitation et des transducteurs de réception permettant d'induire et de mesurer la meilleure réponse du système est imposée par plusieurs conditions. La source choisie était à la fois suffisamment énergétique et hautes fréquences, condition nécessaire pour obtenir une profondeur d'investigation et une résolution adaptée. Cependant la fréquence centrale des transducteurs que nous disposions (24 et 54 kHz) ne semble pas être optimale pour la discrimination des effets spectraux du sol par rapport à ceux des racines. Il serait intéressant d'utiliser des transducteurs larges bandes ([5-25]kHz), qui permettraient d'étudier d'autres modes de propagation plus discriminants et de prospecter plus profondément tout en gardant une résolution suffisante (cf. section v) ;
- afin de valider la théorie d'un guide d'onde, nous avons raisonné à partir des impédances acoustiques. La méthodologie employée nécessite à la fois une bonne transmission de l'énergie fournie sur le sol puis transmise à la racine (coefficient de réflexion (R) faible, impédances racine/sol proche de 1), mais aussi une forte réflexion lorsque l'onde est transmise dans la racine pour être guidée vers le tronc (coefficient de réflexion (R) fort, impédances racine/sol élevé). Lorsque l'on considère des vitesses de propagation de l'ordre de celles obtenues pour un bois sain (et l'impédance moyenne d'un limon) cela tend à privilégier la transmission de l'énergie vers la racine.

La seconde contribution est d'avoir déterminé quelles sont les quantités physiques pertinentes parmi la vitesse, l'amplitude de l'onde reçue (l'atténuation) et les propriétés spectrales, pouvant être utilisées pour la détection. A ce stade de notre recherche, la vitesse est clairement le paramètre le plus pertinent à interpréter puisqu'elle est conditionnée par un pointé que l'on réalise manuellement. Ce pointé n'est réalisé que lorsque le signal est de bonne qualité. Dans ce cas, si la variation angulaire de la vitesse calculée dépasse un intervalle de confiance (défini par les erreurs sur le positionnement, sur le pointé et sur la tortuosité de la racine), il est alors vraisemblable que l'origine puisse être attribuée à la présence de racines dans le sol. Les autres paramètres sont conditionnés par d'autres facteurs, en particulier par la source et la méthodologie de traitement introduisant des incertitudes initiales.

Étant donné l'incertitude sur les résultats, il était important d'orienter le travail vers l'analyse des propriétés spectrales qui permettait d'enrichir notre connaissance sur le milieu de propagation de l'onde. Par conséquent, la dernière contribution porte sur l'étude du spectre et de son évolution temporelle (méthode temps-fréquence) à partir de plusieurs méthodes de traitements de plus en plus fines. Aucun mode de propagation vraiment discriminant a pu être mis en évidence avec l'analyse de Fourier. A partir de l'analyse en ondelettes, des modifications mineures semblent montrer que la racine transporte mieux l'onde transmise pour des modes

situés à des fréquences inférieures à 20 kHz. L'analyse en ACP discrimine bien les signaux pour certaines fréquences. Néanmoins aucune tendance ne permet de montrer que la racine transmet mieux l'onde sur une gamme de fréquence excepté à basses fréquences en accord avec l'analyse en ondelettes.

Les expériences ont été réalisées dans des conditions favorables en laboratoire et sur un dispositif avec des racines dans un sol de propriétés connues. L'hétérogénéité des matériaux de digues, les changements de teneurs en eau (vertical et horizontal) et de la compaction reflètent le challenge de la mise en œuvre des méthodes de détection sur les digues.

Validation sur les digues du Rhône (région d'Arles)

L'étude sur un cas concret réalisé sur les digues du Rhône avait deux principaux objectifs : (i) la mise en place d'une méthodologie d'acquisition et (ii) l'évaluation des méthodes géophysiques mises en œuvre.

Adaptation d'une méthodologie de cartographie des systèmes racinaires implantés dans les digues fluviales

A ce jour, de nombreuses méthodes géophysiques sont applicables sur les digues et font l'objet de recherche. Néanmoins les techniques de polarisation provoquée sont peu utilisées sur ces ouvrages, principalement car elles augmentent le temps d'acquisition. A notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à l'évaluation de la végétation par méthode géophysique sur les ouvrages hydrauliques. Nous avons adopté la stratégie proposée par [Fargier et al. \(2014\)](#) lors d'un diagnostic de digue pour laquelle l'acquisition s'effectue en deux temps. Une première acquisition a été obtenue à l'aide de profils longs puis une seconde plus localisée avec des profils plus courts de distances inter-électrodes réduites.

L'acquisition à l'aide de profils longs s'est avérée très utile car, dans la majorité des cas, une digue n'est pas homogène dans sa construction. Il est important d'étudier la variabilité au sein même de l'ouvrage, afin de déterminer si l'origine des anomalies observées, sur le second profil, provient bien de la présence de réseaux racinaires et non d'autres facteurs. A ce stade seule la méthode de tomographie électrique peut renseigner sur l'homogénéité de la digue dans son ensemble, la méthode acoustique n'ayant pas une profondeur d'investigation suffisante (avec un transducteur de fréquence centrale de 24 kHz).

Dans un second temps, les profils sont réalisés avec des distances inter-électrodes réduites. Celle-ci est en général fixée en fonction de la taille de l'anomalie recherchée, soit dans notre cas approximativement de 10 cm. Cette étape correspond à une analyse plus fine en vue de la cartographie des directions des racines principales situées dans le premier mètre. Ces profils de plus hautes résolutions doivent être placés de façon stratégique en pied de digue pour estimer l'intrusion ou non de racines dans le corps de digue lorsque l'arbre se situe de part et d'autre de l'ouvrage. L'acquisition acoustique est rapide et peut donner une indication sur un profil à réaliser préférentiellement en tomographie électrique, puisqu'elle fournit, lorsque cela est possible, une information sur 360° autour de l'arbre.

Évaluation des méthodes utilisées

L'acquisition à l'aide de profils longs s'est avérée très utile afin de définir la position globale des anomalies provoquées par la présence de végétation. Nous avons montré dans la majorité des cas que nous distinguons bien la présence de la végétation, la position des arbres étant corrélée au terme d'amplitude de la résistivité et dans une moindre mesure à la chargeabilité.

Notons que ces résultats ont été obtenus dans des conditions de teneur en eau faibles et sur une digue réputée homogène de nature limoneuse. En plus de définir la variabilité spatiale de la digue, nous avons obtenu des résultats en terme de volume racinaire enfoui (systèmes racinaires superficiels ou non).

Cependant en conditions réelles et pour les profils courts, il est moins aisé de déterminer l'origine de l'anomalie. Pour cela, nous disposons de plusieurs indices témoignant de la présence ou non de racines, valables pour les deux méthodes :

- deux types d'anomalies que l'on qualifiera soit d'étendues, soit de localisées, ont pu être observées. Les dimensions (la taille et l'extension) de l'anomalie doivent refléter une certaine réalité physique. Par exemple sur un arbre de 10 cm de diamètre au collet, nous ne pouvons pas attribuer l'origine d'une anomalie de 50 cm d'extension à la présence d'une racine. Lorsque l'anomalie est étendue, cela est plutôt attribué à un changement de lithologie ;
- la comparaison avec les données issues de la littérature est aussi un indice pertinent afin d'en déduire l'origine de l'anomalie. De plus au cours des expériences, les valeurs des quantités physiques pour différents états ont pu être déterminées.

La taille et la profondeur des racines sont les facteurs d'influence de la détectabilité. Les racines proches de la surface peuvent être plus facilement identifiées que les petites à grande profondeur.

Notre étude doit être considérée comme une première étape dans le développement de la détection de racine dans les digues. Ces travaux ouvrent donc de nombreuses perspectives.

Perspectives

Insertion d'information a priori pour le traitement et l'interprétation de la tomographie géoélectrique

Deux types d'informations peuvent être introduites afin d'alimenter la tomographie de résistivité complexe aux différentes étapes, à savoir l'acquisition, le traitement et l'interprétation.

- la première information est la connaissance experte qui peut servir dans les étapes d'acquisition et d'interprétation ; à partir de l'analyse visuelle de l'arbre et de son environnement de croissance, il est possible de définir des zones de croissance racinaire plus probables ;
- la seconde est la contribution de la connaissance acquise à partir de la tomographie acoustique de type sol/tronc. Par exemple en tomographie électrique, lorsque les électrodes sont proches les unes des autres (afin d'obtenir une résolution permettant de distinguer une racine isolée), une variabilité importante des mesures dans les premiers décimètres du sol due à des artefacts est observée. Or il est probable que des racines traçantes soient situées dans cette tranche de sol. Dans notre étude, les résultats de la tomographie acoustique sont utilisés uniquement lors de l'interprétation, par simple calage et comparaison des données. Une perspective intéressante est de considérer un modèle initial construit à partir de données acoustiques pour améliorer l'inversion des

données géoélectrique.

Optimisation de l'acquisition des données et développement méthodologique pour le diagnostic à grand rendement

La durée de l'acquisition est un critère fondamental en vue de pouvoir mettre en œuvre les méthodes de façon opérationnel pour le diagnostic de digues. Une réduction du temps d'acquisition, sans perte d'information peut être envisagée grâce aux points suivants :

- améliorer la qualité de l'acquisition et l'interprétation des données peut aussi consister à mieux placer des transducteurs/électrodes. En acoustique, la méthodologie employée gagnerait certainement en richesse d'informations en plaçant deux nouveaux capteurs de réception : (i) un le plus proche de la source qui mesurerait l'impulsion initiale et donnerait une indication sur la source. Ce même capteur pourrait enregistrer l'onde régressive liée à la réflexion sur le tronc et sa propagation dans la racine. (ii) un à mi-distance entre le source et la tronc afin d'enregistrer d'éventuelles réflexions. En électrique, placer une électrode dans le tronc peut être utile afin d'enregistrer les variations du potentiel liées aux variations des flux de sèves témoignant de l'activité se produisant dans le sol par les racines. Dans ce cas, l'injection se fait dans le sol et la mesure de potentiel dans le tronc (à la manière de la tomographie acoustique sol/tronc) ;
- d'autres part, dans une configuration plus conventionnelle, l'acquisition des données peut être optimisée en considérant un dispositif formé d'un quadripôle mobile, de type RM15 (Geoscan Research) et permettant la mesure de PP afin d'aller plus vite dans l'investigation du premier mètre ;
- le mode "Full wave" est une technologie récente qui vient d'apparaître sur les instruments de tomographies électriques. Cette avancée instrumentale permet de palier certaines des limites identifiées au cours de cette thèse puisqu'il est possible de mesurer la charge du milieu durant l'injection de courant (en complément de la mesure pendant le courant coupé). D'après [Olsson et al. \(2015\)](#), au delà du bénéfice de réduction du temps de l'acquisition lorsque l'on utilise 100% du cycle de l'onde, le rapport signal sur bruit des mesures de polarisation provoqués est théoriquement augmenté d'un facteur deux. La réduction du temps d'acquisition est fondamentale en vue d'optimiser le rendement de la méthode afin que celle-ci devienne opérationnelle.

Vers de nouveaux champs d'application

Pour aller plus loin, la méthodologie développée dans ces travaux de thèse pourra être mise en œuvre dans différents contextes, dans le cadre de projets portés par IRSTEA ou dans le cadre de collaborations extérieures.

Une des perspectives de cette thèse est l'application de ces méthodes d'imagerie à d'autres ouvrages et notamment dans la continuité du projet RISBA ¹, lequel s'est intéressé à l'analyse, l'évaluation, la prévention et la gestion des risques liés aux barrages collinaires et aux retenues d'altitudes dans la zone transfrontalière italo-française. Ainsi nous avons la volonté, de développer une méthodologie plus simplifiée que celle actuelle pour le diagnostic à haut rendement afin d'aboutir à des conclusions et des recommandations techniques.

1. Risque des barrages - Projet Européen Alcotra Interreg

Une seconde perspective est l'utilisation de la méthode de tomographie électrique dans le domaine de l'agroforesterie. L'arbre, en compétition avec la culture dès sa plantation, enfonce naturellement ses racines plus profondément. Ce faisant, il décolmate le sol et favorise la circulation capillaire de l'eau profonde, tout en permettant aux pluies de mieux s'infiltrer pour recharger la nappe. Puis cette eau est partiellement redistribuée en surface lorsque le sol est sec, l'arbre entretenant ainsi les communautés du sol (bactéries, champignons) avec lesquelles il est en symbiose et dont il dépend pour sa nutrition, les cultures voisines profitant de cet apport. L'application des méthodes géophysiques permettrait d'identifier les racines d'arbres sièges de cet "ascenseur" hydraulique afin de mieux comprendre dans quelles conditions ces phénomènes sont avantageux pour les cultures.

Une dernière perspective, en cours de réalisation sur le site de l'OHP², est l'étude du fonctionnement d'une forêt méditerranéenne face aux changements climatiques. Tout comme l'architecture du houppier d'un arbre témoigne du changement climatique, les réseaux racinaires sont contraints de s'y adapter. A cet égard, l'application de ces méthodes d'imagerie est intéressante.

2. Oak Observatory at the OHP, Observatoire de Haute Provence

Bibliographie

- 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(9) :921–937. pages 14
- Aki, K. and Richards, P. (1980). Quantitative seismology : Theory and methods. *Vol 2*. pages 53
- 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 Physiol*, 28(10) :1441–1448. pages 18, 32, 33
- 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(4) :213–222. pages 32, 33
- Ancn, G. E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *I. Pet Tech*, 5. pages 29, 30
- Angersbach, A., Heinz, V., and Knorr, D. (2002). Evaluation of process-induced dimensional changes in the membrane structure of biological cells using impedance measurement. *Biotechnology Progress*, 18(3) :597–603. pages 47
- Antoine, R., Fauchard, C., Fargier, Y., and Durand, E. (2015). Detection of Leakage Areas in an Earth Embankment from GPR Measurements and Permeability Logging. *International Journal of Geophysics*, 2015 :1–9. pages 18
- Arnott, S., Best, A., Dix, J., and Gregory, D. (2002). Acoustical properties of waterlogged wood. *Acta Acustica united with Acustica*, 88 :1–4. pages 61, 92
- Arnott, S. H., Dix, J. K., Best, A. I., and Gregory, D. J. (2005). Imaging of Buried Archaeological Materials : The Reflection Properties of Archaeological Wood. *Marine Geophysical Researches*, 26(2-4) :135–144. pages 58, 59, 60, 235
- Aubrecht, L., Staněk, Z., and Koller, J. (2006). Electrical measurement of the absorption surfaces of tree roots by the earth impedance method : 1. Theory. *Tree Physiol*, 26(9) :1105–1112. pages 18, 47, 228
- Aulen, M. and Shipley, B. (2012). Non-destructive estimation of root mass using electrical capacitance on ten herbaceous species. *Plant and Soil*, 355(1) :41–49. pages 47
- Bambara, G., Curt, C., Mériaux, P., Vennetier, M., and Vanloot, P. (2014). Évaluation de la vulnérabilité des digues fluviales soumises au développement d’une végétation arborescente. In *32èmes Rencontres universitaires de génie civil*, pages 379–388. pages 17, 162, 197
- Barner, M., Hauser, E., and Wolfe, P. (2001). The use of non-invasive geophysics to assess damage by burrowing animals to earthen levees near dayton, ohio. In *Proceedings of the Symposium on the Applications of Geophysics for Engineering and Environmental Problems (SAGEEP)*. pages 18
- Barton, C. V. M. and Montagu, K. D. (2004). Detection of tree roots and determination of root diameters by ground penetrating radar under optimal conditions. *Tree Physiol*, 24(12) :1323–1331. pages 21

-
- Bary-Lenger, A. and Nebout, J.-P. (1993). Le chêne. *Editions du Perron, Allier-Liège*. pages 11
- Beall, F. (2002). Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood Science and Technology*, 36(3) :197–212. pages 61, 65
- Blanchet, P., Gendron, G., Cloutier, A., and Beaugard, R. (2005). Numerical prediction of engineered wood flooring deformation. *Wood and fiber science*, 37(3) :484–496. pages 56, 229
- Boaga, J., Rossi, M., and Cassiani, G. (2013). Monitoring Soil-plant Interactions in an Apple Orchard Using 3d Electrical Resistivity Tomography. *Procedia Environmental Sciences*, 19 :394–402. pages 151
- Bodner, G., Leitner, D., Nakhforoosh, A., Sobotik, M., Moder, K., and Kaul, H.-P. (2013). A statistical approach to root system classification. *Frontiers in Plant Science*, 4. pages 12
- Boleve, A. (2009). *Localisation et quantification des zones de fuites dans les digues et les barrages par la méthode du potentiel spontané*. PhD thesis, Université de Savoie. pages 18, 24
- Boleve, A., Janod, F., Revil, A., Lafon, A., and Fry, J.-J. (2011). Localization and quantification of leakages in dams using time-lapse self-potential measurements associated with salt tracer injection. *Journal of Hydrology*, 403(3) :242–252. pages 18
- Bolt, B. A. (1976). Nuclear explosions and earthquakes. the parted veil. pages 55, 57, 229
- Boundless (2015). Movement of Water and Minerals in the Xylem. *Boundless*. pages 23, 227
- Brancheriau, L., Baillères, H., Détienne, P., Gril, J., and Kronland, R. (2006). Key signal and wood anatomy parameters related to the acoustic quality of wood for xylophone-type percussion instruments. *Journal of Wood Science*, 52(3) :270–273. pages 84
- Brekhovskikh, L. (2012). *Waves in Layered Media 2e*, volume 16. Elsevier. pages 58
- Bruneau, C. and Dixneuf, P. H. (2006). Metal vinylidenes and allenylidenes in catalysis : Applications in anti-markovnikov additions to terminal alkynes and alkene metathesis. *Angewandte Chemie International Edition*, 45(14) :2176–2203. pages 53
- Bucur, V. (2006). *Acoustics of wood*, volume 1431. Springer Science & Business Media. pages 61
- Bucur, V. and Feeney, F. (1992). Attenuation of ultrasound in solid wood. *Ultrasonics*, 30(2) :76–81. pages 61
- Burgess, S. S. O., Adams, M. A., and Bleby, T. M. (2000). Measurement of sap flow in roots of woody plants : a commentary. *Tree Physiol*, 20(13) :909–913. pages 151
- Caruba, R., Mano, J., Dars, R., and Turco, G. (1974). Corrosions expérimentales de cristaux de zircons et comparaison avec des corrosions naturelles de zircons de granites albitisés. *Tschermaks mineralogische und petrographische Mitteilungen*, 21(1) :33–46. pages 27, 36, 227, 228
- Chapman, D. L. (1913). Li. a contribution to the theory of electrocapillarity. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 25(148) :475–481. pages 30
- Cole, K. S. and Cole, R. H. (1941). Dispersion and absorption in dielectrics i. alternating current characteristics. *The Journal of Chemical Physics*, 9(4) :341–351. pages 48

-
- Corcoran, M. K., Gray, D. H., Biedenharn, D. S., Little, C. D., Leech, J. R., Pinkard, F., Bailey, P., and Lee, L. T. (2010). Literature Review-Vegetation on Levees. Technical report, DTIC Document. pages 1, 8
- Cosenza, P., Ghorbani, A., Florsch, N., and Revil, A. (2007). Effects of drying on the low-frequency electrical properties of tournemire argillites. *Pure and Applied Geophysics*, 164(10) :2043–2066. pages 129
- Cox, K. D., Scherm, H., and Serman, N. (2005). Ground-penetrating Radar to Detect and Quantify Residual Root Fragments Following Peach Orchard Clearing. *HortTechnology*, 15(3) :600–607. pages 21
- Dahlin, T., Dalsegg, E., and Sandström, T. (2013). Data Quality Quantification for Time Domain IP Data Acquired along a Planned Tunnel near Oslo, Norway. In *Procs. Near Surface Geoscience 2013*. pages 40, 141
- Dahlin, T., Leroux, V., and Nissen, J. (2002). Measuring techniques in induced polarisation imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 50(3) :279–298. pages 40, 149, 169
- Dalton, F. (1995). In-situ root extent measurements by electrical capacitance methods. *Plant and soil*, 173(1) :157–165. pages 48, 127, 228
- Damaj, J. (2006). *Auscultation et surveillance des perturbations hydromécaniques d'ouvrages souterrains par méthodes ultrasonores*. PhD thesis, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL. pages 59
- 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*, 303(1-2) :1–34. pages 14
- de Oliveira, F. G. R. and Sales, A. (2006). Relationship between density and ultrasonic velocity in brazilian tropical woods. *Bioresource technology*, 97(18) :2443–2446. pages 60
- Debye, P. J. W. (1929). *Polar molecules*. Chemical Catalog Company, Incorporated. pages 48
- Deroo, L. and Fry, J. J. (2014). Projet National ERINOH - Erosion interne - Approches et besoins en matière d'ingénierie. Rapport de recherche LC/10/ERI/68. pages 12
- Di Iorio, A., Lasserre, B., Scippa, G. S., and Chiatante, D. (2005). Root system architecture of quercus pubescens trees growing on different sloping conditions. *Annals of Botany*, 95(2) :351–361. pages 14
- Dittmer, H. J. (1937). A quantitative study of the roots and root hairs of a winter rye plant (secale cereale). *American Journal of Botany*, pages 417–420. pages 12
- Doussan, C., Pierret, A., Garrigues, E., and Pagès, L. (2006). Water Uptake by Plant Roots : II – Modelling of Water Transfer in the Soil Root-system with Explicit Account of Flow within the Root System – Comparison with Experiments. *Plant and Soil*, 283(1-2) :99–117. pages 24, 151
- Drénou, C. (2006). *Les racines : face cachée des arbres*. Forêt privée française. pages 14
- Drouineau, S., Fourcaud, T., Houllier, F., Schütz, J. P., and Stokes, A., V. M. (2000). L'arbre dans le vent. *Les Dossiers de l'environnement de l'INRA*, (20) :163–169. pages 8
- Dukhin, S. S., Shilov, V. N., and Bikerman, J. (1974). Dielectric phenomena and double layer in disperse systems and polyelectrolytes. *Journal of The Electrochemical Society*, 121(4) :154C–154C. pages 38

-
- Dupuy, L., Fourcaud, T., and Stokes, A. (2005). A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension. *European Journal of Soil Science*, 56(3) :319–327. pages 14
- Dutta, R., Cohn, A. G., and Muggleton, J. M. (2013). 3d mapping of buried underworld infrastructure using dynamic Bayesian network based multi-sensory image data fusion. *Journal of Applied Geophysics*, 92 :8–19. pages 205
- Edwards, J. T. and Hillel, A. J. (1977). The electrical resistivity of G. P. zones. *Philosophical Magazine*, 35(5) :1221–1229. pages 141
- ERINOH, P. (2010). Méthode de diagnostic pour l’analyse de la stabilité des digues soumises à une érosion interne, j. *Monnet, M. Broucke*. pages 8, 20, 227
- Čermák, J., Nadezhdina, N., Meiresonne, L., and Ceulemans, R. (2008). Scots pine root distribution derived from radial sap flow patterns in stems of large leaning trees. *Plant and Soil*, 305(1) :61–75. pages 151
- Fargier, Y., Lopes, S. P., Fauchard, C., François, D., and Côte, P. (2012). 2d-electrical resistivity imaging for sike survey : Impact of the a priori information management. In *Near Surface Geoscience 2012–18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. pages 18, 19
- Fargier, Y., Lopes, S. P., Fauchard, C., François, D., and Côte, P. (2014). DC-Electrical Resistivity Imaging for embankment dike investigation : A 3d extended normalisation approach. *Journal of Applied Geophysics*. pages 18, 210
- Fauchard, C. and Mériaux, P. (2004). *Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues : Guide pour la mise en oeuvre et l’interprétation*. Editions Quae. pages 6, 17
- Ferrara, C., Barone, P., Salvati, L., and Pettinelli, E. (2014). Ground penetrating radar as remote sensing technique to investigate the root system architecture. *Applied ecology and environmental research*, 12(3) :695–702. pages 21
- Florsch, N., Llubes, M., Téreygeol, F., Ghorbani, A., and Roblet, P. (2011). Quantification of slag heap volumes and masses through the use of induced polarization : application to the Castel-Minier site. *Journal of Archaeological Science*, 38(2) :438–451. pages 126, 147
- Foster, M., Fell, R., and Spannagle, M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5) :1000–1024. pages 1, 8
- Foussadier, R. (2003). Les systèmes racinaires des arbres de la ripisylve : effets des contraintes physiques et exemples. *Les forêts riveraines des cours d’eau, écologie, fonctions et gestion*, pages 124–133. pages 10, 13, 14
- Garré, S., Coteur, I., Wongleecharoen, C., Hussain, K., Omsunrarn, W., Kongkaew, T., Hilger, T., Diels, J., and Vanderborght, J. (2013). Can We Use Electrical Resistivity Tomography to Measure Root Zone Dynamics in Fields with Multiple Crops? *Procedia Environmental Sciences*, 19 :403–410. pages 32
- Garré, S., Günther, T., Diels, J., and Vanderborght, J. (2012). Evaluating Experimental Design of ERT for Soil Moisture Monitoring in Contour Hedgerow Intercropping Systems. *Vadose Zone Journal*, 11(4) :0. pages 32

-
- Garré, S., Javaux, M., Vanderborght, J., Pagès, L., and Vereecken, H. (2011). Three-Dimensional Electrical Resistivity Tomography to Monitor Root Zone Water Dynamics. *Vadose Zone Journal*, 10(1). pages 32, 151
- Gazoty, A., Fiandaca, G., Pedersen, J., Auken, E., and Christiansen, A. (2013). Data repeatability and acquisition techniques for time-domain spectral induced polarization. *Near Surface Geophysics*, 11(1983). pages 155
- Gerhards, C. C. (1982). Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood : an analysis of immediate effects. *Wood and fiber*, 14(1) :4–36. pages 60, 61
- Ghestem, M. (2012). *Quelles propriétés racinaires et quelles espèces-outils pour la stabilisation des points chauds de dégradation en Chine du Sud ?* PhD thesis, AgroParisTech. pages 7
- Ghestem, M., Veylon, G., Bernard, A., Vanel, Q., and Stokes, A. (2013). Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance. *Plant and Soil*, 377(1-2). pages 7
- Ghorbani, A., Camerlynck, C., Florsch, N., Cosenza, P., and Revil, A. (2007). Bayesian inference of the Cole–Cole parameters from time-and frequency-domain induced polarization. *Geophysical prospecting*, 55(4) :589–605. pages 40, 133
- Ghorbani, A., Cosenza, P., Revil, A., Zamora, M., Schmutz, M., Florsch, N., and Jougnot, D. (2009). Non-invasive monitoring of water content and textural changes in clay-rocks using spectral induced polarization : A laboratory investigation. *Applied Clay Science*, 43(3-4) :493–502. pages 129, 153
- Gibert, D., Le Mouél, J.-L., Lambs, L., Nicollin, F., and Perrier, F. (2006). Sap flow and daily electric potential variations in a tree trunk. *Plant Science*, 171(5) :572–584. pages 24, 25, 227
- Gouy, M. (1910). Sur la constitution de la charge électrique à la surface d’un électrolyte. *J. Phys. Theor. Appl.*, 9(1) :457–468. pages 30
- Grossmann, A., Kronland-Martinet, R., and Morlet, J. (1989). Reading and understanding continuous wavelet transforms. In *Wavelets Time-Frequency Methods and Phase Space*, pages 2–20. Springer-Verlag. pages 67
- Grossmann, A. and Morlet, J. (1984). Decomposition of Hardy Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape. *SIAM J. Math. Anal.*, 15(4) :723–736. pages 67
- Gueguen, Y. and Palciauskas, V. (1992). *Introduction à la physique des roches*. Hermann. pages 37, 235
- Gunn, D., Chambers, J., Uhlemann, S., Wilkinson, P., Meldrum, P., Dijkstra, T., Haslam, E., Kirkham, M., Wragg, J., Holyoake, S., Hughes, P., Hen-Jones, R., and Glendinning, S. (2014). Moisture monitoring in clay embankments using electrical resistivity tomography. *Construction and Building Materials*. pages 18
- Guo, L., Lin, H., Fan, B., Cui, X., and Chen, J. (2013). Forward simulation of root’s ground penetrating radar signal : simulator development and validation. *Plant and Soil*, 372(1-2) :487–505. pages 21
- Guyot, A., Ostergaard, K. T., Lenkopane, M., Fan, J., and Lockington, D. A. (2013). Using electrical resistivity tomography to differentiate sapwood from heartwood : application to conifers. *Tree Physiology*, 33(2) :187–194. pages 18, 31

-
- Hagrey, S. A. a. (2007). Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity. *J. Exp. Bot.*, 58(4) :839–854. pages 32, 33, 176, 228
- Hamilton, E. L. and Bachman, R. T. (1982). Sound velocity and related properties of marine sediments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72(6) :1891–1904. pages 60
- Hennig, T., Weller, A., and Canh, T. (2005). The effect of dike geometry on different resistivity configurations. *Journal of applied geophysics*, 57(4) :278–292. pages 18, 174
- Hönig, M. and Tezkan, B. (2007). 1d and 2d Cole-Cole-inversion of time-domain induced-polarization data. *Geophysical prospecting*, 55(1) :117–133. pages 133
- Hördt, A., Blaschek, R., Kemna, A., and Zisser, N. (2007). Hydraulic conductivity estimation from induced polarisation data at the field scale—the krauthausen case history. *Journal of Applied Geophysics*, 62(1) :33–46. pages 141
- Jackson, D. D. (1979). The use of a priori data to resolve non-uniqueness in linear inversion. *Geophysical Journal International*, 57(1) :137–157. pages 50
- Jodry, C., Fargier, Y., Lopes, S. P., Côte, P., and Sanchez, M. (2014). A Cost-effective 3d Electrical Resistivity Imaging Approach for Embankment Dike Assessment. In *Near Surface Geoscience 2014-20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. pages 18
- Jones, G., Sentenac, P., and Zielinski, M. (2014). Desiccation cracking detection using 2-D and 3-D Electrical Resistivity Tomography : Validation on a flood embankment. *Journal of Applied Geophysics*, 106 :196–211. pages 18
- Karaoulis, M., Revil, A., Zhang, J., and Werkema, D. D. (2012). Time-lapse joint inversion of crosswell DC resistivity and seismic data : A numerical investigation. *Geophysics*, 77(4) :D141. pages 51
- Keller, G. V. and Frischknecht, F. C. (1966a). Electrical methods in geophysical prospecting. pages 31
- Keller, G. V. and Frischknecht, F. C. (1966b). Electrical methods in geophysical prospecting. pages 33, 228
- Kemna, A., Binley, A., Ramirez, A., and Daily, W. (2000). Complex resistivity tomography for environmental applications. *Chemical Engineering Journal*, 77(1–2) :11–18. pages 34, 133, 156
- Kiberu, J. (2002). Induced polarization and resistivity measurements on a suite of near surface soil samples and their empirical relationship to selected measured engineering parameters. *International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands, available at : <http://www.itc.nl/library/Papers/msc>*. pages 39
- Koestler, J. N., Bibelriether, H., and Brueckner, E. (1968). *Die wurzeln der waldbäume*. Parey. pages 10, 227
- Kolsky, H. (1963). *Stress waves in solids*, volume 1098. Courier Corporation. pages 60
- Kuang, W. and Nelson, S. (1998). Low-frequency dielectric properties of biological tissues : a review with some new insights. *Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers*, 41(1) :173–184. pages 38

-
- L Auriau, P Mériaux, S Lacombe, S Marmu, J Maurin, and A Boulay (2012). The airborne high-resolution LiDAR as an efficient tool for topographical survey and detection of surface anomalies on flood protection dike. In *Comprehensive Flood Risk Management*. CRC Press. pages 9
- Lamb, H. (1917). On waves in an elastic plate. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing papers of a mathematical and physical character*, pages 114–128. pages 61
- Lasaygues, P. (2006). *Tomographie ultrasonore osseuse : Caractérisation de la diaphyse des os par inversion d'un champ acoustique diffracté ; Intérêt pour l'imagerie pédiatrique*. PhD thesis, Université de la Méditerranée-Aix-Marseille II. pages 84
- Le Mouël, J.-L., Gibert, D., and Poirier, J.-P. (2010). On transient electric potential variations in a standing tree and atmospheric electricity. *Comptes Rendus Geoscience*, 342(2) :95–99. pages 24
- Lefebvre, J.-P. (1985). 1-la tomographie d'impédance acoustique. pages 56
- Lemaster, R. and Wilcox, W. (1993). The use of acousto-ultrasonics to detect decay in wood-based products. In *the Second International Conference on Acousto-Ultrasonics, Atlanta, GA*, pages 188–190. pages 61
- Leroy, P. and Revil, A. (2004). A triple-layer model of the surface electrochemical properties of clay minerals. *Journal of Colloid and Interface Science*, 270(2) :371–380. pages 38
- Lesmes, D. P. and Friedman, S. P. (2005). Relationships between the electrical and hydrogeological properties of rocks and soils. In *Hydrogeophysics*, pages 87–128. Springer. pages 34, 36
- Lo, W.-C., Yeh, C.-L., and Tsai, C.-T. (2007). Effect of soil texture on the propagation and attenuation of acoustic wave at unsaturated conditions. *Journal of hydrology*, 338(3) :273–284. pages 18, 60
- Loke, M., Chambers, J., and Ogilvy, R. (2006). Inversion of 2d spectral induced polarization imaging data. *Geophysical Prospecting*, 54(3) :287–301. pages 133
- Loke, M. H. (1999). Time-lapse resistivity imaging inversion. In *Proceedings of the 5th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society European Section, Em1*. pages 50
- Luo, Y. and Zhang, G. (1998). *Theory and application of spectral induced polarization*. Society of Exploration Geophysicists Tulsa. pages 133
- Mancuso, S. (2011). *Measuring Roots : An Updated Approach*. Springer. pages 33, 41, 228
- Martin, D.-G. T. (2009a). an Eichen (*Quercus* spp.). pages 129
- Martin, T. (2009b). Complex resistivity (CR) of wood and standing trees. In *Proc. of the 16th International Symp. on Nondestructive Testing and Evaluation of Wood*, pages 10–15. pages 44, 45, 137, 228
- Martin, T. (2012). Complex resistivity measurements on oak. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(1) :45–53. pages 41, 43, 129, 153
- Martinis, R., Socco, L. V., Sambuelli, L., Nicolotti, G., Schmitt, O., and Bucur, V. (2004). Tomographie ultrasonore pour les arbres sur pied. *Annals of Forest Science*, 61(2) :157–162. pages 198

-
- Meriaux, P. (2001). *Surveillance, Maintenance and Diagnosis of Flood Protection Dikes*. pages 6, 7, 227
- Milsom, J. and Eriksen, A. (2011). *Field geophysics*, volume 36. John Wiley & Sons. pages 64
- Morelli, G., Zenone, T., Teobaldelli, M., Fischanger, F., Matteucci, M., and Seufert, G. (2007). Use of ground-penetrating radar (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT) to study tree roots volume in pine forest and poplar plantation : Proceeding 5th International Workshop Functional-Structural Plant Models. *Napier, New Zealand*, 21 :1-4. pages 21
- Moreno, F., Fernández, J. E., Clothier, B. E., and Green, S. R. (1996). Transpiration and root water uptake by olive trees. *Plant and soil*, 184(1) :85-96. pages 24
- Morlat, R. and Venin, G. (1981). Effets comparés de deux techniques d'entretien du sol sur l'enracinement de la vigne et sur le milieu édaphique. *Agronomie*, 1(10) :887-896. pages 70
- Morlet, J., Arens, G., Fourgeau, E., and Glard, D. (1982). Wave propagation and sampling theory-part i : Complex signal and scattering in multilayered media. *Geophysics*, 47(2) :203-221. pages 67
- Morse, P. M., Morse, P. M., and Morse, P. M. (1948). *Methods of Theoretical Physics*, volume 2. McGraw-Hill New York. pages 61
- Mériaux, P., Vennetier, M., Aigouy, S., Hoonakker, M., and Zylberblat, M. (2006). Diagnosis and management of plant growth on embankment dams and dykes. pages 1-20, Barcelone. pages 1, 8
- Muggleton, J., Brennan, M., and Rogers, C. (2014). Point vibration measurements for the detection of shallow-buried objects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 39 :27-33. pages 119, 205
- Naudet, V. (2004). *Les méthodes de résistivité électrique et de potentiel spontané appliquées aux sites contaminés*. PhD thesis, Université de droit, d'économie et des sciences - Aix-Marseille III. pages 26
- Nicolotti, G., Socco, L., Martinis, R., Godio, A., and Sambuelli, L. (2003). Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. *Journal of Arboriculture*, 29(2) :66-78. pages 61, 198
- Niederleithinger, E., Weller, A., Lewis, R., Stötzner, U., Fechner, T., Lorenz, B., Nießen, J., and Wiebe, G. (2008). Evaluation of geophysical methods for river embankment investigation. In *Proceedings of 4th International Symposium of Flood Defense*. pages 18
- Okay, G. (2011). *Caractérisation des hétérogénéités texturales et hydriques des géomatériaux argileux par la méthode de Polarisation Provoquée : Application à l'EDZ de la station expérimentale de Tournemire*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France. pages 130, 131, 145
- Olhoeft, G. (1985). Low-frequency electrical properties. *Geophysics*, 50(12) :2492-2503. pages 34
- Olsson, P.-I., Dahlin, T., Fiandaca, G., and Auken, E. (2014). Measuring time domain spectral ip in the on-time-decreasing acquisition time and increasing signal-to-noise ratio. In *Near Surface Geoscience 2014-20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. pages 41

-
- Olsson, P.-I., Dahlin, T., Fiandaca, G., and Auken, E. (2015). Measuring time-domain spectral induced polarization in the on-time : decreasing acquisition time and increasing signal-to-noise ratio. *Journal of Applied Geophysics*. pages 134, 212
- Orsi, T. H. and Dunn, D. A. (1991). Correlations between sound velocity and related properties of glacio-marine sediments : Barents sea. *Geo-Marine Letters*, 11(2) :79–83. pages 58
- Ozier-Lafontaine, H. and Bajazet, T. (2005). Analysis of Root Growth by Impedance Spectroscopy (EIS). *Plant and Soil*, 277(1-2) :299–313. pages 48
- Palacky, G. (1988). Resistivity characteristics of geologic targets. *Electromagnetic methods in applied geophysics*, 1 :53–129. pages 136, 176
- 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. *Dixièmes Journées AGAP-Qualité, Aix en Provence*, pages 21–22. pages 18
- Parasnis, D. S. (1966). Electromagnetic prospecting—cw techniques. *Geoexploration*, 4(4) :177–208. pages 38
- Pasquet, S., Siltecho, S., Rungsun, I.-E., Hammecker, C., Clermont, C., Wiriyaakitnateekul, W., Suvannang, N., Silvera, N., Robain, H., Podwojewski, P., and Hovhannissian, G. (2011). Soil spatial variability studies by geophysical methods and its effect on "soil-water-plant-atmosphere" interaction processes in rubber-tree plantations in thailand. In *Annual seminar of the Hevea Research Platform in Partnership (HRPP)*, Surat Thani, Thailand. pages 18
- Patton-Mallory, M. and DeGroot, R. C. (1990). Detecting brown-rot decay in southern yellow pine by acousto-ultrasonics. In *Proc Seventh Inter Symp on Nondestructive Testing of Wood Symposium*. pages 61
- Perri, M. T., Boaga, J., Bersan, S., Cassiani, G., Cola, S., Deiana, R., Simonini, P., and Patti, S. (2014). River embankment characterization : The joint use of geophysical and geotechnical techniques. *Journal of Applied Geophysics*, 110 :5–22. pages 18
- Petersen, T. and Hagrey, S. A. a. (2009). Mapping root zones of small plants using surface and borehole resistivity tomography. *The Leading Edge*, 28(10) :1220–1224. pages 32
- Peyras, L., Rivard, P., Breul, P., Millet, A., and Ballivy, G. (2015). Characterization of rock discontinuity openings using acoustic wave amplitude—application to a metamorphic rock mass. *Engineering Geology*. pages 59
- Pierce, A. D. et al. (1991). *Acoustics : an introduction to its physical principles and applications*. Acoustical Society of America Melville, NY. pages 61
- Preston, G., McBride, R., Bryan, J., and Candido, M. (2004). Estimating root mass in young hybrid poplar trees using the electrical capacitance method. *Agroforestry Systems*, 60(3) :305–309. pages 46, 48
- Rayleigh, J. W. S. B. (1896). *The theory of sound*, volume 2. Macmillan. pages 57
- Razafindratsima, S., Cosenza, P., P., Hovhannissian, G., Camerlynck, C., and Tabbagh, A. (2003). Influence de la teneur en eau sur les propriétés électriques complexes des matériaux argileux : un état des connaissances. pages 52

-
- Repo, T., Laukkanen, J., and Silvennoinen, R. (2005). Measurement of the tree root growth using electrical impedance spectroscopy. *Silva Fennica*, 39(2) :159–166. pages 41
- Revil, A. and Florsch, N. (2010). Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media. *Geophysical Journal International*, 181(3) :1480–1498. pages 31, 228
- Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons. pages 38, 39, 228
- Richard, P. (2011). Inexpensive geophysical instruments supporting groundwater exploration in developing nations. *Journal of Water Resource and Protection*, 2011. pages 28, 227
- Richart, F. E., Hall, J. R., and Woods, R. D. (1970). Vibrations of soils and foundations. pages 53
- Rinn, F. (1999). Vorrichtung zur materialprüfung. Technical report. PCT7DE00/01467 (Pr. 11.Mai 1999). pages 62
- Rinn, F. (2003). Technische grundlagen der impuls tomographie. Technical report. Baumzeitung 8, 29-31, Thalacker verlag, Braunschweig. pages 62
- Rinn, F. (2004a). Holzanatomische grundlagen der schall tomographie an bäumen. Technical report. Neue Landschaft 7, 44- 47, Patzer Verlag, Berlin – Hannover. pages 62
- Rinn, F. (2004b). Statische hinweise im schall tomogramm von bäumen. Technical report. Stadt und Grün 7, 41-45, Patzer Verlag Berlin – Hannover. pages 62
- Rinn, F. (2005). Den wurzeln auf der spur. Technical report. DeGa 2/2005, S.14. pages 62
- Rinner, F. (2005). Root diagnostics with stress wave tomography. pages 62, 63, 229
- Rittgers, J. B., Revil, A., Planes, T., Mooney, M. A., and Koelewijn, A. R. (2015). 4-D imaging of seepage in earthen embankments with time-lapse inversion of self-potential data constrained by acoustic emissions localization. *Geophysical Journal International*, 200(2) :756–770. pages 18
- Routh, P. S., Oldenburg, D. W., and Li, Y. (1998). Regularized inversion of spectral ip parameters from complex resistivity data. *In practice*, 600 :5. pages 133
- Royal, A. C. D., Atkins, P. R., Brennan, M. J., Chapman, D. N., Chen, H., Cohn, A. G., Foo, K. Y., Goddard, K. F., Hayes, R., Hao, T., Lewin, P. L., Metje, N., Muggleton, J. M., Naji, A., Orlando, G., Pennock, S. R., Redfern, M. A., Saul, A. J., Swingler, S. G., Wang, P., and Rogers, C. D. F. (2011). Site Assessment of Multiple-Sensor Approaches for Buried Utility Detection. *International Journal of Geophysics*, 2011 :1–19. pages 205
- Royer, D. and Dieulesaint, E. (2001). *Propagation et génération des ondes élastiques*. Ed. Techniques Ingénieur. pages 56
- Saracco, G. (1989). *Propagation acoustique en régime harmonique & transitoire a travers un milieu inhomogene : Méthodes asymptotiques & Transformation en ondelettes*. PhD thesis, Universite de la Méditerranée, Faculte des Sciences de Luminy, Aix-Marseille II. pages 67
- Saracco, G., Corsain, G., Leandre, J., and Gazanhes, C. (1991). Propagation d’ondes spheriques monochromatiques a travers une interface plane fluide/fluide : applications numeriques et experimentales au dioptré plan air/eau. *Acustica*, 73(1) :21–32. pages 58

-
- Saracco, G., Grossmann, A., and Tchamitchian, P. (1987). Use of wavelet transforms in the study of propagation of transient acoustic signals across a plane interface between two homogeneous media. In *Wavelets Time-Frequency Methods and Phase Space*, pages 139–146. Springer-Verlag. pages 58
- Saracco, G., Guillemain, P., and Kronland-Martinet, R. (1990). Characterization of elastic shells by the use of the wavelet transform. In *IEEE Ultrasonics Symposium*, volume 2, pages 881–885. pages 69
- Saracco, G., Labazuy, P., and Moreau, F. (2004). Localization of self-potential sources in volcano-electric effect with complex continuous wavelet transform and electrical tomography methods for an active volcano. *Geophysical research letters*, 31(12) :L12610. pages 23
- Saracco, G., Thouveny, N., Bourlès, D. L., and Carcaillet, J. T. (2009). Extraction of non-continuous orbital frequencies from noisy insolation data and from palaeoproxy records of geomagnetic intensity using the phase of continuous wavelet transforms. *Geophysical Journal International*, 176(3) :767–781. pages 68, 69, 229
- Schleifer, N., Weller, A., Schneider, S., and Junge, A. (2002). Investigation of a Bronze Age plankway by spectral induced polarization. *Archaeological Prospection*, 9(4) :243–253. pages 41, 45, 46, 51, 136, 137, 140, 156, 228
- Schlumberger, C. (1920). *Etude sur la prospection électrique du sous-sol*. Gauthier-Villars. pages 33
- Schweingruber, F. H. and Bosshard, W. (1982). Mikroskopische holzanatomie : Formenspektren mitteleuropäher stamm-und zweig hölzer zur bestimmung von rezentem subfossilem. pages 42, 228
- Sharp, M., Wallis, M., Deniaud, F., Hersch-Burdick, R., Tourment, R., Matheu, E., Seda-Sanabria, Y., Wersching, S., Veylon, G., Durand, E., Smith, P., Forbis, J., and Spliethoff, C. (2013). The international Levee Handbook. pages 8
- Sheriff, R. E. and Geldart, L. P. (1995). *Exploration seismology*. Cambridge university press. pages 53
- Shilov, V., Delgado, A., Gonzalez-Caballero, F., and Grosse, C. (2001). Thin double layer theory of the wide-frequency range dielectric dispersion of suspensions of non-conducting spherical particles including surface conductivity of the stagnant layer. *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects*, 192(1) :253–265. pages 38
- Shumway, G. (1960). Sound speed and absorption studies of marine sediments by a resonance method. *Geophysics*, 25(2) :451–467. pages 60
- Slater, L. D. and Lesmes, D. (2002). Ip interpretation in environmental investigations. *Geophysics*, 67(1) :77–88. pages 201
- Socco, L. V., Sambuelli, L., Martinis, R., Comino, E., and Nicolotti, G. (2004). Feasibility of ultrasonic tomography for nondestructive testing of decay on living trees. *Research in Nondestructive Evaluation*, 15(1) :31–54. pages 198
- Stern, O. (1924). Zur theorie der elektrolytischen doppelschicht. *Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie*, 30(21-22) :508–516. pages 30

-
- Stokes, A. (1999a). 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(1) :17–27. pages 8
- Stokes, A. (1999b). Strain distribution during anchorage failure of *pinus pinaster* ait. at different ages and tree growth response to wind-induced root movement. *Plant and Soil*, 217(1-2) :17–27. pages 14
- Stokes, A., Atger, C., Bengough, A. G., Fourcaud, T., and Sidle, R. C. (2009). Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant and Soil*, 324(1-2). pages 7
- 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(4) :374–384. pages 14
- Tarantola, A. (2005). *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation*. siam. pages 49
- Tarantola, A. and Valette, B. (1982). Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion. *Rev. Geophys. Space Phys*, 20(2) :219–232. pages 49
- Thierry, B., Weller, A., Schleifer, N., and Westphal, T. (2001). Polarisation effects of wood. *Ext. Abst. für Tagungsband zur EEGS, p44-45, Birmingham*. pages 41
- Tsoumis, G. et al. (1991). *Science and technology of wood. Structure, properties, utilization*. Van Nostrand Reinhold. pages 61
- Tsourlos, P. I., Szymanski, J. E., and Tsokas, G. N. (1999). The effect of terrain topography on commonly used resistivity arrays. *Geophysics*, 64(5) :1357–1363. pages 18
- Ursino, N., Cassiani, G., Deiana, R., Vignoli, G., and Boaga, J. (2013). Measuring and modelling water related soil–vegetation feedbacks in a fallow plot. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(8) :11151–11184. pages 18
- Van Ree, C., Van, M., Heilemann, K., Morris, M., Royet, P., and Zevenbergen, C. (2011). Floodprobe : technologies for improved safety of the built environment in relation to flood events. *Environmental Science & Policy*, 14(7) :874–883. pages 8, 18
- Vanderborght, J., Huisman, J. A., Kruk, J., and Vereecken, H. (2013). Geophysical Methods for Field-Scale Imaging of Root Zone Properties and Processes. *Soil–Water–Root Processes : Advances in Tomography and Imaging*, (soilwaterrootpr) :247–282. pages 33, 41
- Vanhala, L., Eeva, M., Lapinjoki, S., Hiltunen, R., and Oksman-Caldentey, K.-M. (1998). Effect of growth regulators on transformed root cultures of *hyoscyamus muticus*. *Journal of plant physiology*, 153(3) :475–481. pages 34
- Vary, A. (1988). *The acousto-ultrasonic approach*. Springer. pages 65
- Vennetier, M., Mériaux, P., Busset, F., Félix, H., and Lacombe, S. (2010). Apport de la télédétection lidar aéroporté haute définition pour la caractérisation de la végétation des digues. *Revue Francaise de Photogrammétrie et Télédétection*, (191) :p–36. pages 9
- Vennetier, M., Mériaux, P., and Zanetti, C. (2015a). *Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai : guide technique*. Cadère éditeur, Aix en Provence, irstea edition. pages 7, 9

-
- Vennetier, M., Zanetti, C., Meriaux, P., and Mary, B. (2015b). Tree root architecture : new insights from a comprehensive study on dikes. *Plant Soil*, 387(1-2) :81–101. pages 12, 14, 167
- Wang, X., Divos, F., Pilon, C., Brashaw, B. K., Ross, R. J., and Pellerin, R. F. (2004). *Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools*. USDA FS Forest Products Laboratory General Technical Report FPL-GTR-147. US Dept. of Agriculture Forest Service. Washington. pages 61, 84
- Weller, A., Nordsiek, S., and Bauerochse, A. (2006). Spectral Induced Polarisation – a Geophysical Method for Archaeological Prospection in Peatlands. *J. Wetl. Archaeol.*, 6(1) :105–125. pages 41
- Werban, U., Attia al Hagrey, S., and Rabbel, W. (2008). Monitoring of root-zone water content in the laboratory by 2d geoelectrical tomography. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(6) :927–935. pages 32, 151
- Wilcox, W. W. (1988). Detection of early stages of wood decay with ultrasonic pulse velocity. *Forest Products Journal*, 38(5) :68–73. pages 61
- Yuval and Oldenburg, D. W. (1997). Computation of cole-cole parameters from ip data. *Geophysics*, 62(2) :436–448. pages 133
- Zanetti, C. (2010a). *Caractérisation du développement des systèmes racinaires ligneux dans les digues*. PhD thesis, Université de Provence. pages 13, 14, 15, 76, 227
- Zanetti, C. (2010b). L'enracinement des arbres dans les digues en remblai : étude des systèmes racinaires et impacts sur la sécurité des ouvrages. pages 1
- Zanetti, C., Vennetier, M., Mériaux, P., and Provansal, M. (2015). Plasticity of tree root system structure in contrasting soil materials and environmental conditions. *Plant Soil*, 387(1-2) :21–35. pages 12, 167
- Zanetti, C., Vennetier, M., Mériaux, P., Royet, P., and Provansal, M. (2011a). Managing woody vegetation on earth dikes : Risks assessment and maintenance solutions. *Procedia Environmental Sciences*, 9(0) :196–200. pages 5
- Zanetti, C., Weller, A., Vennetier, M., and Mériaux, P. (2011b). Detection of buried tree root samples by using geoelectrical measurements : a laboratory experiment. *Plant and Soil*, 339(1) :273–283. pages 18, 41, 42, 43, 130, 137, 147, 153, 175, 228, 235
- 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(10) :1047–1058. pages 21, 32

Table des figures

1.1	Coupe type en travers d'une vallée endiguée d'après Meriaux (2001)	6
1.2	Coupe type d'une digue homogène du Petit Rhône en Camargue d'après Meriaux (2001)	6
1.3	Exemple de digue en remblai zoné selon Meriaux (2001) d'après CNR	7
1.4	Exemples de cas d'érosion externe (Photographie : C. Zanetti)	8
1.5	Phénomène d'érosion interne : les preuves directes du phénomène d'érosion interne par les racines ne sont visuellement identifiables avant dégradation de l'ouvrage. L'investigation géotechnique de fontis (1.5a) pouvant mener à des dégradations plus fortes (1.5c), a néanmoins permis de montrer que certaines de ces dégradations étaient corrélées à la présence de végétation (restes de racines existantes)	9
1.6	Densité et positionnement des arbres sur la digue	10
1.7	Structure racinaire selon Koestler et al. (1968)	10
1.8	Composition et décomposition du bois	11
1.9	Identification des différentes structures racinaires de différentes espèces [Hypothèse 1a]	13
1.10	Répartition (en terme de pourcentage) des types de structure racinaire en fonction des matériaux, toutes espèces confondues d'après Zanetti (2010a), [Hypothèse 2b]	13
1.11	Influence du type de sol sur la densité et la profondeur de croissance des systèmes racinaires (1.11a) et du taux moyen de décroissance en diamètre des racines (en mm/m)(1.11b)	14
2.1	Ouvrage 3 dimensions (longitudinal, transversale, profondeur), soumis à un chargement hydraulique lors d'une crue - Ligne piezométrique (pointillé bleu) lors d'une charge correspondant à une crue centennale.	19
2.2	La principale approche recommandée pour la prospection géophysique première approche, localisation des anomalies, seconde approche pour la cartographie locale du corps de digue d'après ERINOH (2010)	20
2.3	Radargramme d'un profil à proximité d'arbres; les flèches roses indiquent la présence hypothétique de racines, les flèches rouges, la probable stratigraphie (limites entre les couches de terre) (Source : IRSTEA)	21
2.4	Circulation de l'eau, absorption par les radicelles, transport dans le tronc par cohésion et absorption dans les cellules du xylem, transpiration par les feuilles d'après Boundless (2015)	23
2.5	(a) Flux de sève mesuré sur deux capteurs, proches de l'électrode 32, située sur le tronc. (b) Température extérieure. (c) Potentiel électrique mesuré sur l'électrode (E32). (d) Dérivée première de l'évolution temporelle du potentiel montré en (c). Les repères sur l'axe des abscisses indiquent 24h (Gibert et al., 2006)	25
2.6	Lignes de courant et équipotentielles pour deux électrodes d'injection au dessus d'un sol homogène. a) vue en plan, b) vue en coupe, c) voltage le long de l'axe recoupant C_1 et C_2 (Caruba et al., 1974)	27
2.7	Schéma de la configuration d'électrodes Schlumberger et Wenner α inspiré de Richard (2011)	28

2.8	Schéma de la distribution des espèces ioniques dans l'espace des pores d'un milieu poreux chargé à l'équilibre, d'après Revil and Florsch (2010). L'eau interstitielle est caractérisée par une densité de charge volumique \bar{Q}_v correspondant à la charge de la couche diffuse par unité de volume de pores (en $C.m^{-3}$). La couche de Stern est responsable d'un excès de conductivité de surface Σ^s (en S) en fonction de la conductivité de l'eau interstitielle σ_f tandis que la couche diffuse est responsable d'un excès de conductivité de surface Σ^d . La couche de Stern est comprise entre le plan o (surface de minérale) et le plan d, qui est le plan interne de la couche diffuse électrique. La couche diffuse se prolonge à partir du plan d vers les pores	31
2.9	Résistivité ρ des sols et du bois selon Hagrey (2007), inspiré de Keller and Frischknecht (1966b)	33
2.10	Signaux de formes sinusoïdales montrant le courant appliqué (A) et le signal de potentiel mesuré (V) pour la mesure de résistivité complexe à une fréquence (pulsation ω) fixée	34
2.11	Utilisation de l'instrument LIPPMANN en mode sondage ABMN lors de mesure de polarisation provoquée spectrale in-situ; électrodes d'injection métallique, électrodes de mesures de potentiel impolarisables de type Petiaut	36
2.12	Courbe de decharge selon Caruba et al. (1974)	36
2.13	Utilisation du Terrameter SAS4000 lors de mesure de polarisation provoquée temporelle in-situ - Centrale d'acquisition relié à un switch multichannel - Batterie d'alimentation et câbles de connexion)	37
2.14	Déformation de la double couche électronique lors de l'application du champ électrique \vec{E} extérieur, selon Reynolds (2011)	38
2.15	Différents mécanismes de polarisation de membrane selon Reynolds (2011)	39
2.16	Différents types d'électrodes (Impolarisable/Polarisables) suivant leurs utilisations	40
2.17	Diagramme schématique du passage d'un courant alternatif à travers les tissus de la plante à faibles et hautes fréquences, d'après Mancuso (2011)	41
2.18	Anatomie du bois de quatre espèces à l'échelle macroscopique montrant une distribution diffuse des pores pour le frêne et le peuplier, et des pores circulaires pour le chêne et le robinier selon Schweingruber and Bosshard (1982)	42
2.19	Mesure de polarisation provoquée spectrale (à l'aide du SIPFUCHS III) d'échantillons racinaires de différentes espèces selon Zanetti et al. (2011b)	43
2.20	Mesure de polarisation provoquée spectrale (sur des arbres vivants); comparaison des résultats obtenus en été et en hiver d'après Martin (2009b)	45
2.21	Spectre de la phase obtenu sur des échantillons de frêne. La gamme de fréquence couverte sur les mesures de terrain est marquée par la zone grise. Tous les échantillons ont été analysés plusieurs fois pour évaluer la répétabilité (Schleifer et al., 2002)	45
2.22	Résultat de l'inversion de la mesure à 4,77 Hz selon le profil parallèle à la planche archéologique. L'emplacement prévu de la planche est encadré par un rectangle (Schleifer et al., 2002)	46
2.23	Vue schématique du dispositif expérimental pour la mesure de la surface d'absorption racinaire. Abréviations : G = Alimentation basse fréquence; mA = Ampèremètre; I = courant; U = voltage; R = rayon de la sphère et V = voltmètre. (Aubrecht et al., 2006)	47
2.24	Modèle conceptuel d'un circuit racine-sol selon Dalton (1995)	48
2.25	Schématization du principe des méthodes inverses	49
2.26	Organigramme du processus d'inversion et exemple sur des données expérimentales	50

2.27	Ondes de volume. Modifié d'après Bolt (1976)	55
2.28	Plans d'anisotropie du bois selon Blanchet et al. (2005), L : Longitudinale, R : Radiale, T : Transversale	56
2.29	Ondes de surface. Modifié d'après Bolt (1976)	57
2.30	Exemple de la propagation dans un sol limoneux d'un paquet d'ondes produit par un signal impulsionnel (au marteau) - Mise en évidence 1/ de l'extension de l'enveloppe du paquet d'ondes c'est-à-dire que le milieu est dispersif - 2/ du phénomène d'atténuation (diminution de l'amplitude sur l'échelle des ordon- nées); signaux acquis lors de mesure de terrain avec le dispositif présenté sur la figure 2.33	59
2.31	Shématisation (échelle non respectée) des phénomènes de réflexion, réfraction et transmission pour un milieu à deux couches (sol et racine) et du phénomène de guide d'onde	62
2.32	Etapes d'acquisition 2.32a et d'analyse des résultats selon la méthodologie d'après Rinner (2005)	63
2.33	Exemple des capteurs (sources et récepteurs) utilisés lors de l'application de la méthode RINTECH in-situ. A - Pénétrromètre dynamique; B - Transducteur ultrasonique; C - Source Marteau (un accéléromètre y est fixé); D - Plaque en fer permettant de générer des ondes avec la source marteau	64
2.34	Exemple de signal enregistré à l'aide de capteur ultrasonique (Sofranel); la ligne verticale rouge représente le pointé manuel de la première perturbation	66
2.35	Exemple de translation dilatation à partir de l'ondelette de Morlet. En ligne pleine, la partie réelle; en pointillée, la partie imaginaire	68
2.36	Au milieu : phase de CCWT du signal, En bas : module de CCWT du signal. Le module est représenté avec un code couleur où le maximum d'énergie est en bleu et le minimum en rouge (Saracco et al., 2009)	69
2.37	A gauche : erreur en mètre sur l'estimation de la distance au tronc; à droite : vitesse réelle (isovaleurs) en fonction de la tortuosité et de la vitesse mesurée	70
4.1	Dessouchage d'une souche de frêne implantée sur la digue de l'Isère; photogra- phies Daniel Bambara	76
4.2	Dispositifs à différents stades de décomposition d'échantillons racinaires	77
4.3	Vue aérienne du dispositif expérimental situé à Aix en Provence en région PACA	78
4.4	Mise en place du dispositif expérimental	79
4.5	Analyse granulométrique selon les normes NF P 94-056 (Tamisage) et NF P 94-057 (Sédimentation) d'un échantillon du matériaux extrait du dispositif	79
4.6	Plantation du peuplier sur la placette n°1; identification des directions et dia- mètres des trois racines principales (26/04/2013); la position et la taille des racines ont aussi été relevées à la suite des essais	81
4.7	Plantation du peuplier sur la placette n°5; identification des directions et dia- mètres des deux racines principales (26/04/2013)	81
4.8	Plantation du peuplier sur la placette n°3; identification des directions et dia- mètres des 5 racines principales (26/04/2013); la position et la taille des racines ont aussi été relevées à la suite des essais	81
5.1	Calibration du transducteur source du Boviar (effectuée par D. Baden)	85
5.2	Étude des caractéristiques temporelle et spectrale du transducteur source Bo- viar; à gauche : enregistrement de signaux dans l'air pour des distances SR respectivement de 2,5,10 et 20 cm . A droite, spectres correspondants	85
5.3	Résultat de l'analyse en ondelettes complexes (Morlet) du signal source (voie 2, distance SR = 5 cm)	86

5.4	Résultat de l'analyse en ondelettes complexe (Morlet) du signal de la voie 4 (distance SR = 5 cm)	86
5.5	Mesure en transmission sur des échantillons de différentes natures	87
5.6	A gauche : histogramme de la vitesse en fonction du numéro d'échantillon; à droite : Nuage de points de l'amplitude RMS en fonction de la vitesse	88
5.7	Analyse temps-échelle (5.7a) et spectrale (5.7b) de l'échantillon de sol; vitesse = 552 m/s; amplitude RMS = $2,3 \times 10^{-2}$ V; longueur-diamètre = 6-5 cm	90
5.8	Analyse temps-échelle (5.8a) et spectrale (5.8b) de l'échantillon racinaire 9; vitesse = 746 m/s; amplitude RMS = $8,5 \times 10^{-3}$ V; longueur-diamètre = 15.5-4,5 cm	90
5.9	Analyse temps-échelle (5.9a) et spectrale (5.9b) de l'échantillon racinaire 12; vitesse = 3455 m/s; amplitude RMS = $2,11 \times 10^{-3}$ V; longueur-diamètre = 8-13 cm	91
5.10	Dispositif expérimental pour l'étude en tomographie; A - échantillon racinaire sélectionné (préalablement mesuré en transmission) pour être enterré - B : branchements des 4 voies de réception sur le TDA16 - C : positionnement central de la racine avant d'être enterrée - D : position du transducteur source (fil orange) en déport par rapport aux transducteurs de réception - E : ligne de transducteurs de réceptions espacés à intervalles Δx réguliers	93
5.11	Comparaison des signaux ($Y_{CDP} = 0,25$ m et $D_{SR} = 20$ cm entre la cuve avec racine longitudinale (noire) de la cuve de référence (rouge)	95
5.12	Comparaison des amplitudes RMS (Volts) de propagation obtenues dans la cuve avec racine (transversalement) puis parallèlement et dans la cuve de sol seul en fonction de la position x,y et z de la réflexion	96
5.13	Analyse temps-échelle (5.13a) et spectrale (5.13b) du signal issu de la cuve avec l'échantillon de racine pour l'acquisition dans la direction longitudinale; vitesse = 1176 m/s; amplitude RMS = $6,5 \times 10^3$ V; voie 4	97
5.14	Analyse temps-échelle (5.14a) et spectrale (5.14b) du signal issu de la cuve avec l'échantillon de racine pour l'acquisition dans la direction transversale; vitesse = 1637 m/s; amplitude RMS = $5,05 \times 10^3$ V; voie 4	98
5.15	Analyse temps-échelle (5.15a) et spectrale (5.15b) du signal issu de la cuve de référence; vitesse = 388 m/s; amplitude RMS = $5,9 \times 10^3$ V; voie 4	98
5.16	Résultats de l'analyse en ondelettes de Gauss et comparaison des transformées en fonction de la cuve à la position $X_{CDP}, Y_{CDP} = (0,25,0,25)$	99
5.17	Résultats de la corrélation croisée des transformations à partir d'une ondelette de Gauss des mesures en cuve de référence et contenant la racine (n°6) avec le signal obtenu sur la mesure en transmission (racine °6)	100
5.18	Résultats de la corrélation croisée (XWT : cross wavelet transformation) des transformations à partir d'une ondelette de Gauss des mesures en cuve de référence et contenant la racine (6) avec une sinusoïde de fréquence 24, 54 et 108 kHz	101
5.19	Etude par ACP des différences entre les cuves témoin et contenant l'échantillon racinaire - Nuage de points des observations (R : cuve avec racine, Sol : uniquement le sol) dans le plan des composantes principales 1 et 4. Pourcentage de variance expliquée = 31%	102
5.22	Dispositif utilisé pour l'estimation des caractéristiques des sources; (1) Pénétrromètre (2) Plaque de couplage pour la source marteau; V_i : voie numéro i de mesure (la voie 4 est utilisée pour caractériser la source)	106

5.23	En haut : représentation de la forme du signal dans le domaine temporel selon la source; en bas de gauche vers la droite : Densité spectrale d'énergie (DSE), DSE normalisée puis DSE normalisée dans la gamme de fréquence théorique du transducteur	107
5.24	Géométrie d'acquisition de la tomographie sol/tronc	108
5.25	Mise en évidence de la position réelle des racines après excavation en vue d'une comparaison avec les données physiques	109
5.26	Comparaison des variations angulaires de l'amplitude RMS selon les quatre voies de mesure placées sur le tronc - Le trait plain rouge représente la moyenne des quatre voies	111
5.27	Comparaison des variations angulaires de la vitesse selon les quatre voies de mesure placées sur le tronc - Le trait plain rouge représente la moyenne des quatre voies	112
5.28	Comparaison des profils angulaires selon la source	113
5.29	Profil angulaire de l'amplitude RMS; cercle 80 cm	113
5.30	Comparaison des variations angulaires de l'amplitude (5.30a) et de la vitesse (5.30b) selon les quatre voies de mesure placées sur le tronc pour les deux cercles, 80 cm et 120 cm	115
5.31	Comparaison des profils angulaires selon différentes quantités physiques	116
5.32	Superposition de l'histogramme des occurrences de racines avec le profil angulaire de vitesse obtenu sur le cercle de diamètre 80 cm (en rouge)	117
5.33	Superposition de l'histogramme des trois racines principales (diamètre \geq 15 mm) avec le profil angulaire de vitesse obtenu sur le cercle de diamètre 120 cm (en rouge)	117
5.34	Superposition de l'histogramme des occurrences de racines avec le profil angulaire d'amplitude RMS obtenu sur le cercle de diamètre 80cm (en rouge)	118
5.35	Visualisation des variations angulaires des paramètres spectraux	119
6.1	Mesure en transmission à l'aide d'un dispositif de type Wenner α constitué d'électrodes médicales – AB sont les électrodes d'injections (film de Carbone, Ag/AgCl), et MN les électrodes de mesures du potentiel	130
6.2	Dispositif de mesure de la polarisation dans la direction transverse à un échantillon de racine enfoui dans un sol	131
6.3	Mesure de l'évolution et de la répétabilité de la mesure au cours de l'expérience et détermination des intervalles d'incertitudes pour la mesure PPS et PPT	132
6.4	Comparaison des spectres de l'échantillon de frêne (échantillon T48) et du sol lors de mesures conduites en laboratoire. Comparaison des mesures obtenues à partir du SIPFUCHS (en noir) avec les mesures du LIPPMANN (en rouge). Chaque échantillon est mesuré plusieurs fois afin de s'assurer de la reproductibilité.	134
6.5	Du haut vers le bas : comparaison des décroissances pour l'échantillon racinaire T48 et pour l'échantillon de sol pour une durée d'injection de 4 s; en ligne pleine rouge, modélisation par un modèle de Cole-Cole généralisé des décroissances. Résidus entre le modèle et les points expérimentaux. Simulation de la réponse PPS en introduisant les quatre paramètres déterminés de la mesure PPT dans le modèle de Cole-Cole	135

6.6	Du haut vers le bas : Exemple de décroissance pour l'échantillon racinaire T48 en fonction des différentes durées d'injection de 1 à 4 s; en ligne pleine rouge, modélisation par un modèle de Cole-Cole généralisé des décroissances. Résidus entre le modèle et les points expérimentaux. Simulation de la réponse PPS en introduisant les quatre paramètres déterminés de la mesure PPT dans le modèle de Cole-Cole	136
6.7	Module (en haut) et de phase (en bas) de la conductivité en fonction de la masse racinaire enterrée	138
6.8	Comparaison de la décroissance de potentiel en fonction de la durée de l'injection soit de 2 s ou 8 s sur deux volumes racinaires par rapport au sol	139
6.9	Observation des différences de chargeabilité (6.9a) et résistivité (6.9b) entre le sol et différentes tailles d'échantillons racinaires lors des mesures de polarisation provoquée temporelles; influence de la durée d'injection de courant	139
6.10	Présentation de la placette expérimentale d'étude et du protocole d'acquisition pour l'étude in-situ	142
6.11	Résultat de la cartographie de polarisation provoquée spectrale effectuée à l'aide du LIPPMANN sur la placette de référence; en haut : module de la résistivité en $\Omega.m$, En bas : phase en mrad	143
6.12	Résultat de la cartographie de polarisation provoquée spectrale effectuée à l'aide du LIPPMANN sur la placette 1; en haut : module de la résistivité en $\Omega.m$, En bas : phase en mrad	144
6.13	Schéma du dispositif de laboratoire. Une racine cylindrique est enterrée dans une cuve remplie avec un sol majoritairement limoneux. Des électrodes en acier inoxydable pour l'injection et la mesure de potentiel sont placées à la surface de la cuve selon un dispositif de type Wenner α	148
6.14	Tendance de la diminution temporelle de la teneur en eau au cours de l'expérience de laboratoire : dans la cuve contenant le sol seul (A, rouge) mais aussi dans la cuve contenant l'échantillon de racine (B, bleue)	148
6.15	Présentation des différentes étapes menant à l'évaluation de la distribution racinaire dans le sol de la placette d'étude (n°1)	149
6.16	Shématisation et photographie de la stratégie d'acquisition des données lors de l'expérience menée in-situ	150
6.17	Evolution de la partie réelle (σ') et de la partie imaginaire (σ'') avec la décroissance de la teneur en eau. Les croix rouges représentent les mesures dans la cuve contenant la racine, les croix bleues dans le sol seul. Toutes les fréquences de 0,26 Hz à 25 Hz sont représentées sur σ''	152
6.18	Comparaison entre la cuve A (sol seul) et B (incluant une racine) pour la partie réelle σ' (figure 6.18a) et imaginaire σ'' (figure 6.18b) de la conductivité au cours de l'assèchement du milieu. L'évolution de la teneur en eau Θ est représentée sur un troisième axe en haut de chaque graphique. La ligne pleine représente la position pour laquelle les valeurs sont identiques entre les deux cuves. Les lignes pointillées représentent les limites significatives entre les cuves. Les lignes verticales montrent les limites de la gamme de teneur en eau observée lors de l'expérience in-situ	153

6.19	Sections ρ et M_T obtenues le premier jour (le 6 Aout) avec 25% de teneur en eau 6.19A : Sections inversées de ρ (Ωm) (échelle log) et de M_T (ms) pour les deux profils situés à A1 - 20 cm et A2 - 70 cm du tronc. 6.19B : Superposition de la fréquence racinaire (ligne pointillée) et respectivement les profils d'amplitude de la résistivité ρ et de chargeabilité M_T extraits à 25 cm de profondeur (Lignes bleues continues : Amplitude de la résistivité ρ - En rouge : Amplitude de la chargeabilité totale M_T	154
6.20	Histogrammes montrant le pourcentage de différences entre la mesure au temps initial (T0), pour toutes les mesures de valeurs apparentes du profil n°1 de l'amplitude de la résistivité ρ (en haut), et de la chargeabilité totale M_T avec les valeurs à T0 + 2h	155
6.21	155
6.22	Sections de chargeabilité totale inversées; 6.22.a : référence (06 Aout) du premier profil montrant aussi la fréquence racinaire à 25 cm de profondeur (au dessus); 6.22.b : différences relatives entre le jour i+1 et i	157
7.1	Localisation des deux sites d'étude sur un plan large; site 1 : situé en rive gauche du petit Rhône; site 2 : situé en rive droite du Grand Rhône.	164
7.2	Contexte historique et reconstitution des paléochenaux du Petit et Grand Rhône d'après les archives du SYMADREM	164
7.3	Présentation du site d'étude n°1, Mas Beaumont	165
7.4	Sondage géotechnique situé à proximité du site d'étude (approximativement 200 m) d'après les archives du SYMADREM	166
7.5	Observations visuelles à proximité du chêne (n°2) choisi pour l'étude; flèches rouges : départs probables de racine primaire superficielles; hachures blanches : zone de concentration d'humus (dépôt de feuilles en décomposition)	166
7.6	Présentation du site de la digue Beaujeu du Petit-Rhône Rive gauche (site n°2)	167
7.7	Arbre sélectionné, chêne avec un diamètre au collet de 75 cm; superposition des positionnements des profils à la topographie de la digue (site n°1)	171
7.8	Visualisation 3D du positionnement des profils géophysiques sur la digue; le cercle rouge symbolise la position de l'arbre	171
7.9	Géométrie d'acquisition de tomographie sol/tronc utilisé sur l'arbre d'étude	172
7.10	Fixation des capteurs sur le tronc préalablement écorcé suivant les quatres axes principaux (Nord-Sud-Est-Ouest)	173
7.11	Stratégie d'acquisition et positionnement des profils géoélectriques sur la digue du site de Beaujeu (Grand Rhône rive droite)	174
7.12	A gauche : erreur en mètre sur l'estimation de la distance au tronc; à droite : vitesse réelle en fonction de la tortuosité et de la vitesse mesuré	178
7.13	Section n°1 inversée; espacement inter-électrodes =1 m; profil de 64 m réalisé en Wenner-Schlumberger. Les points rouges représentent la position des arbres sur le profil. En haut : amplitude de la résistivité électrique/ En bas : amplitude de la chargeabilité totale	178
7.15	Profils 3,2 et 5 inversés; espacement inter-électrodes =0,2 m; profils de 6,4 m réalisés en Wenner-Schlumberger. En haut : amplitude de la résistivité électrique/ En bas : amplitude la chargeabilité totale; échelles indépendantes permettant une meilleure visualisation des contrastes	180
7.14	Profil p4 inversé (voir positionnement sur la figure 7.8); espacement inter-électrodes = 0,2 m; profils de 6,4 m réalisés en Wenner-Schlumberger. Identification des anomalies 1 et 2.	181

7.16	Positionnement des plans 2D sous une représentation 3D vue transverse à la digue; les échelles de couleurs sont dépendantes; le point rouge indique la position de l'arbre	182
7.17	Etude des propriétés spectrales de l'onde la première arrivée (enregistrement à partir des capteurs à 24 kHz)	183
7.18	Identification des modes de propagations de l'onde par transformée en ondelettes	184
7.19	Comparaison de la qualité des signaux enregistrés in-situ (Arles Rive Gauche) en fonction du type de capteurs et de l'angle par rapport à la source	186
7.20	Représentation stéréographique de l'amplitude des signaux sélectionnés après détermination du rapport S/N supérieur à 3	187
7.21	Variations angulaires des différentes quantités physiques; capteurs Boviari centrés à 54 kHz; cercle d'acquisition de rayon $r=1,5$ m	188
7.22	Variations angulaires des différentes quantités physiques; capteurs Boviari centrés à 54 kHz; cercle d'acquisition de rayon $r=1,5$ m	189
7.23	Variations angulaires des différentes quantités physiques; capteurs Sofranel centrés à 24 kHz; cercle d'acquisition de rayon $r=1,5$ m; les données ont été acquises uniquement sur un demi-cercle de 0 à 180°	190
7.24	Variations de vitesse de propagation de l'onde la première arrivée; capteurs Boviari centrés à 54 kHz; cercle d'acquisition de rayon $r=3$ m	191
7.25	Calage des données acoustiques (cercles) avec les données de profils électriques. Transformation par projection des coordonnées cartésiennes (x,y) vers des coordonnées cylindriques $((r, \theta))$	194
7.26	Comparaison des profils angulaires obtenus de l'amplitude de la résistivité électrique (ρ en $\Omega.m$) avec la vitesse de propagation de l'onde acoustique (V en m/s); l'échelle de l'axe des ordonnées est réglée afin d'obtenir les valeurs encadrées à \pm deux fois l'écart type de la série de données	195
7.27	Comparaison des profils angulaires obtenus de la chargeabilité totale (M_T en $\Omega.m$) avec la vitesse de propagation de l'onde acoustique (V en m/s); l'échelle de l'axe des ordonnées est réglée afin d'obtenir les valeurs encadrées à \pm deux fois l'écart type de la série de données	196
7.28	Intégration des données géophysiques dans le système d'évaluation de la performance des digues en remblai	198
7.29	Section n°1 inversée (profil en crête); espacement inter-électrodes =1 m; profil de 3,2 m réalisé en Wenner-Schlumberger. Les points rouges représentent la position des arbres sur le profil. En haut : amplitude de la résistivité électrique/ En bas : amplitude la chargeabilité totale	199
7.30	Section n°2 inversée (profil transversal); espacement inter-électrodes =0.8m; profil réalisé en Wenner-Schlumberger. Les points rouges représentent la position des arbres sur le profil. En haut : amplitude de la résistivité électrique/ En bas : amplitude la chargeabilité totale puis en échelle logarithmique de base 10.	200
7.31	Section n°3 inversée (profil en crête); espacement inter-électrodes =0,4 m; profil de 3,2 m réalisé en Wenner-Schlumberger. Les points rouges représentent la position des arbres sur le profil. En haut : amplitude de la résistivité électrique/ En bas : amplitude la chargeabilité totale	201
7.32	Profils de chargeabilité normalisés obtenus pour différentes durées d'injection du courant : 1 s (en haut) et 0,1 s (en bas); profil de 3,2 m réalisé en Wenner-Schlumberger	202
7.33	Comparaison de la section de résistivité (en bas) avec la section des différences de chargeabilité entre $TON = 1s - TON = 0,1s$ (en haut)	202

Liste des tableaux

2.1	Critère d'état utilisé pour le modèle d'aide à la décision - Surligné gris : informations que l'on souhaite apporter notamment par les données géophysiques .	17
2.2	Types de polarisation rencontrés dans les milieux poreux et gamme de fréquences associées, inspiré de Gueguen and Palciauskas (1992)	37
2.3	Rapport des conductivités entre les mesures avec et les mesures sans racines enterrées pour la partie réelle et la partie imaginaire de la conductivité à 1.46Hz selon Zanetti et al. (2011b)	43
2.4	Échelle en fréquence des ondes acoustiques	53
2.5	Ordre de grandeur des propriétés acoustiques de matériaux usuels inspiré de Brancheriau HDR et Arnott et al. (2005) (*); aucune fréquence de mesure n'est précisée (pour la mesure sur les milieux hétérogènes	59
4.1	Échantillons de racines restés sur souches issus de la campagne de déterrage sur les digues de l'Isère en août 2013	77
4.2	Analyse du sol utilisé lors des expérimentations in-situ et en laboratoire	80
5.1	Descriptif des échantillons racinaires utilisés pour les essais en transmission acoustique	87
5.2	Synthèse des paramètres caractéristiques mesurés (V_l : vitesse, ρ : masse volumique) lors d'essais en transmission et calculés (Z_a : Impédance acoustique)	92
5.3	Tableau de synthèse des positions source-récepteurs lors de l'expérience de tomographie ultrasonique en cuve	94
5.4	Équivalence distance source-récepteur D_{SR} avec la profondeur d'investigation théorique Z	95
5.5	Rapports des quantités physiques (Vitesse, Amplitude) entre les mesures avec et les mesures sans racines enterrées.	103
6.1	Caractéristiques des échantillons de racines utilisés lors de l'expérience en laboratoire	129
6.2	Résumé des paramètres expérimentaux pour l'étude des propriétés électriques d'échantillons de racines	132
6.3	Synthèse et comparaison avec les travaux de la littérature existante	137
7.1	Résumé des paramètres des profils réalisés sur le site d'étude du Mas Beaumont	171
7.2	Résumé des paramètres des profils réalisés sur le site d'étude de Beaujeu	174
7.3	Comparaison des caractéristiques (qualité et fréquence fondamentale) des signaux suivant le type de capteurs (Boviar ou Sofranel)	185
7.4	Durée de l'acquisition pour différents temps d'injections	202