

## La reconstruction tridimensionnelle des architectures racinaires par le radar à pénétration de sol

A. Aboudourib<sup>1</sup>, M. Serhir<sup>1</sup>, D. Lesselier<sup>2</sup>

<sup>1</sup> : Génie électrique et électronique de Paris (CNRS-CentraleSupélec-Univ. Paris Sud-Univ. Pierre et Marie Curie), Univ. Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette

<sup>2</sup> : Laboratoire des Signaux et Systèmes (CNRS-CentraleSupélec-Univ. Paris-Sud Univ Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette  
abderrahmane.aboudourib@centralesupelec.fr

### Résumé

*Les racines des arbres peuvent endommager les trottoirs, les canalisations et les installations humaines. Par conséquent, la reconstruction du système racinaire dans ses trois dimensions est d'une importance capitale pour comprendre et réduire les interactions entre les arbres et les infrastructures urbaines. Le radar à pénétration de sol (GPR) est une technique non invasive pour l'étude des racines des arbres. Dans cette contribution, des simulations GPR ont été réalisées sur des racines sous le logiciel GprMax en mode 3D sous des conditions de sol hétérogènes. Une chaîne de post-traitement des radargrammes a été développée pour reconstruire les architectures racinaires. Le traitement proposé est basé essentiellement sur la technique de décomposition en valeurs singulières (SVD) pour la réduction du bruit, la Transformée de Hough et la technique du filtre adapté.*

### 1. Contexte de l'étude

Les racines jouent un rôle crucial pour les arbres : elles absorbent l'eau et les nutriments du sol, stockent le carbone et assurent la stabilisation physique de l'arbre. Ainsi, l'estimation de la taille, la biomasse racinaire et la structure tridimensionnelle des racines est d'une grande importance pour prédire le rôle des arbres dans la nature. Traditionnellement, les racines sont caractérisées par des méthodes comme l'excavation et le déracinement qui sont destructrices pour les racines et l'environnement du sol. Le radar à pénétration de sol (GPR) se présente comme un outil prometteur pour la caractérisation des racines en offrant la possibilité de suivre dans le temps l'évolution du système racinaire tout en préservant l'arbre et le sol.

### 2. Simulations et post-traitement des données

L'ensemble des simulations a été réalisé sur GprMax, un outil open-source permettant de simuler la propagation des ondes EM en utilisant la méthode FDTD [1]. Dans le cadre de ce travail, nous proposons de simuler un environnement réaliste en mode 3D. Pour cela, des prototypes réalistes des racines ont été modélisées. D'un point de vue géométrique, nous avons adopté le modèle de Da Vinci pour établir la forme géométrique des racines. Concernant les propriétés diélectriques, les modèles de Maxwell-Garnett et de Straube permettent de les définir à partir de la teneur en eau des racines [2, 4].

En ce qui concerne la modélisation du sol hétérogène, nous avons utilisé le modèle de Peplinski qui relie les propriétés diélectriques du sol à ses caractéristiques classiques [1]. Nous avons combiné ce modèle avec le modèle Fractal qui, quant à lui, permet une distribution stochastique dans l'espace des éléments constituant le sol. Notons que le modèle Fractal et celui de Peplinski sont déjà pré-implémentés sur GprMax.

Afin de reconstruire les structures racinaires simulées, nous avons mis en place une chaîne de post-traitement sur MATLAB R2017b. En effet, la suppression du bruit est une étape primordiale qui doit être accomplie au début du post-traitement. Pour la réaliser, nous avons combiné la technique de soustraction de la médiane avec la méthode de décomposition en valeurs singulières (SVD). Ce qui nous a permis d'atteindre des résultats satisfaisants en termes de réduction de l'effet du sol hétérogène et du couplage entre antennes.

L'étape suivante consiste à appliquer une technique de focalisation. Dans ce travail, nous avons mis en place la technique du filtre adapté [3] et qui repose sur le principe suivant : la réponse impulsionnelle du filtre qui maximise le rapport signal à bruit à la position de la cible (la racine) n'est autre que le signal d'excitation émis, conjugué et inversé dans le temps.

Par ailleurs, la technique du filtre adapté nécessite la connaissance de la permittivité relative du sol contenant les racines. Cependant, nous ne disposons pas de cette valeur étant donné que le sol utilisé dans la simulation est de nature hétérogène (d'ailleurs la même problématique se pose lors des mesures sur le terrain). Pour résoudre ce problème, nous avons développé une solution basée sur une version modifiée de la transformée de Hough aléatoire. Cette technique démarre de la résolution de l'équation de l'hyperbole présente dans le radargramme et permet de déduire la permittivité du sol à partir des paramètres de l'hyperbole. Pour valider notre solution, nous l'avons testé sur des modèles de sol homogènes dont nous maîtrisons la valeur de la permittivité relative. Le taux d'erreur ne dépassait pas 10%.

### **3. Mesures expérimentales**

D'un point de vue expérimental, un système GPR a été mis en place au laboratoire utilisant des antennes de type « papillon complémentaires pliées » opérant dans la gamme de fréquence de 300 MHz et 3 GHz (antennes Ultra Large Bande), et placées contre un bac à sable sec. Pour l'acquisition des données, nous avons opté pour la technique des fréquences échelonnées. En effet, les antennes ont été connectées à un analyseur de réseaux vectoriel portable (VNA) et les mesures du paramètre  $S_{21}$  ont été prélevées en déplaçant les antennes avec un pas de 2 cm. Les mesures ont été réalisées sur des prototypes de racines en bois cylindrique ayant la même longueur de 25 cm et des diamètres qui varient entre 0,5 cm et 2 cm.

Enfin, l'application de la même chaîne de post-traitement utilisée avec les résultats de simulations a permis de reconstruire les structures racinaires avec un degré de résolution acceptable.

### **4. Conclusion et perspectives**

Dans cette contribution, nous avons modélisé un environnement réaliste en 3D avec des modèles géométriques et diélectriques de racines et de sol disponibles dans la littérature. La considération d'un sol hétérogène a permis de tester la robustesse de nos techniques de post-traitement et de nous préparer aux mesures sur le terrain.

Comme sera montré dans l'affiche, que ce soit en simulations numériques ou en mesures expérimentales, nous avons pu reconstruire les structures racinaires étudiées avec une précision acceptable.

Finalement, les systèmes multistatiques permettent une vitesse d'acquisition largement supérieure à celle du bi-statique et assurent une meilleure qualité d'imagerie GPR. C'est dans cette perspective que s'inscrit notre projet qui consiste à modéliser sur GprMax 3D un système GPR multistatique composé de 4 paires d'antennes.

### **5. Bibliographie**

- [1] Warren, C., A. Giannopoulos, and I. Giannakis, "GprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar," *Comp. Phys. Comm.*, Vol. 209, 163-170, 2016.
- [2] Aboudourib, A., M. Serhir, and D. Lesselier, "Impact of root diameter and water content on tree roots detection using ground penetrating radar," *Proceedings of the 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Krakow, Poland, March-April 2019, IEEE Explore, 8739825, 5pp., June 2019.
- [3] Aboudourib, A., M. Serhir, and D. Lesselier, "3D reconstruction of tree roots under heterogeneous soil conditions using Ground Penetrating Radar," *Near Surface Geoscience*, 10<sup>th</sup> International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR2019), The Hague, Netherlands, September 2019.
- [4] Guo, L., Lin, H., Fan, H., Cui, X. and Chen, J., "Forward simulation of root's ground penetrating radar signal: simulator development and validation," *Plant Soil*, vol. 372, no 1-2, pp. 1-19, 2013.