

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	iii
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	xiii
Introduction générale	xv
1 Bases de l'électromagnétisme et principe du GPR	1
1.1 Introduction	2
1.2 Rappels d'électromagnétisme	2
1.2.1 Principe de propagation des ondes EM	2
1.2.2 La méthode FDTD	8
1.3 Aperçu sur le logiciel de simulation gprMax	11
1.4 Principe du GPR	14
1.4.1 Histoire et applications	14
1.4.2 Marché du GPR	15
1.4.3 Bilan de liaison	16
1.4.4 Principe de fonctionnement du GPR	16
1.4.5 Les différents types de GPR	18
1.4.6 Collection de données	20
1.4.7 Résolution d'un système GPR	22
1.4.8 Configurations GPR	23
1.4.9 Antennes GPR	25
1.5 Conclusion	30
2 Le système racinaire : caractérisation et techniques d'investigation	35
2.1 Introduction	36
2.2 Compréhension du système racinaire	36
2.2.1 Qu'est-ce qu'un système racinaire?	36
2.2.2 Architecture racinaire et distribution spatiale	38
2.2.3 Santé et stabilité de l'arbre	40
2.3 Racines et environnement	42
2.3.1 Problèmes liés au génie civil	42
2.3.2 Biomasse racinaire dans l'écosystème forestier	44
2.4 Comparaison des différentes techniques d'étude du système racinaire	45
2.4.1 Techniques destructives	45
2.4.2 Techniques non-destructives	47
2.5 Utilisation du GPR pour l'imagerie des racines et l'estimation de biomasse	52
2.6 Conclusion	57

3 Facteurs limitant la détection des racines par GPR	63
3.1 Introduction	64
3.2 Propriétés de la racine	64
3.2.1 Modèle diélectrique de racine	64
3.2.2 Impact du diamètre et de la teneur en eau sur la détectabilité des racines	69
3.3 Position géométrique de la racine	72
3.3.1 Modèle topologique de racine	72
3.3.2 Impact de l'orientation de la racine sur les données GPR	74
3.4 Propriétés du sol	78
3.4.1 Contexte	78
3.4.2 Modèles diélectriques du sol	81
3.4.3 Modèle géométrique du sol	87
3.5 Conclusion	90
4 Traitement des données GPR pour la reconstruction tridimensionnelle des architectures racinaires	95
4.1 Introduction	96
4.2 Pré-traitement des données	96
4.2.1 Correction du temps zéro	97
4.2.2 Gain temporel	97
4.3 Techniques de réduction du clutter	99
4.3.1 Soustraction de la moyenne/médiane	100
4.3.2 Décomposition en valeurs singulières	101
4.4 Estimation de la permittivité relative du sol	104
4.4.1 Détection des bords par l'opérateur de Canny	106
4.4.2 Approche de la transformée de Hough aléatoire (RHT)	107
4.5 Migration des données	110
4.5.1 Migration SAR basée sur le filtrage adapté	110
4.5.2 Transformée d'Hilbert	114
4.6 Validation de la chaîne de post-traitement sur des données synthétiques	115
4.6.1 Modèles racinaires considérés	115
4.6.2 Résultats du traitement	117
4.6.3 Effet de l'hétérogénéité du sol	119
4.7 Conclusion	120
5 Expérimentations GPR en laboratoire et sur le terrain	125
5.1 Introduction	126
5.2 Expérimentations en laboratoire	126
5.2.1 Système GPR du laboratoire	126
5.2.2 Antennes de mesures	128
5.2.3 Prototypes de racines	129
5.2.4 Résultats du post-traitement	130
5.3 Mesures sur le terrain	133
5.3.1 Équipement de mesure	133
5.3.2 Principe et apport de la technologie HDR	134
5.3.3 Directives sur la collecte de données GPR autour d'arbres réels	137
5.3.4 Site de mesures	138
5.3.5 Résultats du post-traitement	140
5.4 Conclusion	143
Conclusion générale et perspectives	145
Annexe A	149

Annexe B	151
Liste des publications	155
Liste des acronymes	157

Liste des figures

1.1	Propagation d'une onde EM en champ lointain (mode Transverse Electromagnetic (TEM)). Le champ électrique E , le champ magnétique B et la direction de propagation k sont orthogonaux.	6
1.2	Schéma d'une cellule de Yee en 3D.	9
1.3	Schéma saute-mouton (<i>leapfrog</i>) de mise à jour temporelle des champs électrique et magnétique.	10
1.4	Nombre de publications ayant cité gprMax entre 2005 et 2019. (source : www.gprmax.com)	12
1.5	Exemple d'un scénario GPR modélisé en 3-D sur gprMax (scène visualisée sur l'interface Paraview).	12
1.6	Snapshots montrant la propagation du champ électrique avec un pas temporel de 0,7 ns lors d'un A-scan d'un cylindre diélectrique ($\epsilon_r = 24$ et $\sigma = 0.63 \text{ mS/m}$) enfoui dans un sol sableux sec ($\epsilon_r = 4$, $\sigma = 1 \text{ mS/m}$).	13
1.7	Positionnement des différentes applications GPR dans le spectre EM.	15
1.8	Schéma des différents composants d'un système GPR.	17
1.9	Exemple d'un scan GPR avec une représentation en niveaux de gris.	17
1.10	Schéma électronique d'un GPR impulsif.	18
1.11	Représentation du signal d'excitation GPR du type première dérivée de la gaussienne dans les domaines temporel (à gauche) et fréquentiel (à droite).	19
1.12	Schéma électronique d'un GPR à saut de fréquences (SFCW).	19
1.13	Exemple d'un A-scan.	20
1.14	Exemple d'un B-scan. La ligne rouge représente la trace (A-scan) montrée sur la figure 1.13.	21
1.15	Exemple d'un C-scan (issu de Oristaglio et al. [2001]) représentant une image 3-D du sous-sol.	21
1.16	Résolution horizontale et verticale d'un système GPR.	22
1.17	Signaux temporels de largeur W . (a) Les signaux sont clairement séparés lorsque $T \gg W$, (b) Signaux difficiles à distinguer lorsque $T \ll W$	22
1.18	Les trois principales modes d'opération d'un système GPR. (a) Offset commun Tx-Rx, (b) Point Médian Commun (CMP), (c) Source Commune, n_x est l'intervalle de Nyquist défini dans (1.51).	24
1.19	Les différentes orientations des antennes GPR.	24
1.20	Définition des trois zones du champ EM rayonné par une antenne.	25
1.21	Définition de la bande passante d'une antenne par le coefficient de réflexion.	27
1.22	Les différentes polarisations possibles d'une onde EM plane dans le cas où la direction de propagation k est parallèle à z (d'après Nikolova [2007]).	28
1.23	Deux exemples d'antennes cornets.	28
1.24	Schéma d'une antenne Vivaldi avec une ligne d'alimentation micro-ruban.	29
1.25	Schéma d'une antenne papillon (à droite) et son complémentaire (à gauche).	29
2.1	Anatomie de la racine montrée via une coupe transversale (modifié de Gregory [2006]).	37
2.2	Illustration du phénomène d'osmose entre la rhizosphère et la racine.	38

2.3 Les 3 principaux modèles racinaires : (A) système en coeur, (B) système de plaque sol-racine avec de grosses racines traçantes et des pivots et (C) système racinaire pivotant avec un pivot important et de plus petites racines traçantes (d'après Stokes and Mattheck [1996]).	39
2.4 Proportion cumulée de racines pour différents types d'arbres.	40
2.5 Collet et racines d'un pommier atteint par une infection fongique (<i>root rot</i>).	41
2.6 Schéma illustrant les forces subies sous l'effet du vent par le système racinaire d'un arbre de grande taille en sol sableux. (d'après Danjon and Fourcaud [2009]).	41
2.7 Sections transversales de racines de structure avec une forme (a) circulaire, (b) en T et (c et d) en I chez le pin maritime (a, b et c) et l'épinette noire (d) (d'après Saint Cast [2019]).	42
2.8 Racines d'arbres se développant sous des bâtiments.	43
2.9 Dommages causés par les racines aux canalisations.	43
2.10 Dommages causés par les racines aux chaussées en milieu urbain.	44
2.11 Stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers en France métropolitaine (en MtC) (d'après Colin and Derrière [2005]).	45
2.12 Procédure d'installation des sacs en filet pour la technique du noyau de croissance des racines [Smit et al., 2013]. (a) un noyau de terre est enlevé; (b) le sol est tamisé pour enlever les racines; (c) un sac en filet est placé dans le trou, qui est rempli de sol tamisé; (d) le sol est tassé à sa densité apparente d'origine moyennant un pilon; (e) le sac en filet est laissé en place pendant une période de temps déterminée avant d'être récupéré; et (f) les racines non ligneuses sont parées.	46
2.13 Panneau métallique utilisé pour l'excavation monolithique des échantillons sol-racines (à gauche) et des racines après extraction et lavage du sol (à droite). (d'après Leskovar et al. [1994])	46
2.14 Configuration des minirhizotrons à la fois en angle (45°) et en position verticale (90°); l'isolation thermique et les profondeurs d'observation sont indiquées. Les images sont capturées par des systèmes de MR basés sur un appareil photo numérique ou un scanner connectés à un ordinateur portable. Les poignées d'indexation permettent un positionnement exact des appareils dans le tube d'observation; l'intensité lumineuse des systèmes de caméras MR peut être réglée. (d'après Rewald and Ephrath [2013])	47
2.15 Acquisition et traitement de données de tomographie par résistivité électrique; (a) un réseau d'électrodes avec des positions d'électrodes pour deux quadripôles à espacement minimum (en haut) et maximum (en bas). Les points représentent des électrodes; (b) distribution spatiale des volumes de sol auxquels des valeurs de résistivité sont attribuées. Les points représentent le centre de chaque volume; (c) distribution spatiale de la résistivité apparente du sol obtenue après l'acquisition des données; (d) Coupe 2-D de la résistivité réelle du sol obtenue après inversion des données. (d'après Amato et al. [2010])	48
2.16 Système de détection acoustique des racines (modifié de Buza and Divós [2016]). . .	49
2.17 Reconstruction du système racinaire par la technique de détection acoustique (à gauche) et le résultat de l'excavation (à droite). (d'après Buza and Divós [2016]) . . .	50
2.18 Reconstruction dessinée à la main d'un système racinaire d'arbre basée sur l'analyse des données GPR [Hruska et al., 1999].	52
2.19 Comparaison entre les données GPR et la reconstruction de l'architecture racinaire par le système laser après excavation (d'après [Zenone et al., 2008]).	53
2.20 Modes de mesure du système racinaire des arbres par GPR. (a) acquisitions circulaires; (b) lignes d'acquisition parallèles.	55

2.21 En mode réflexion (a), une antenne bipolaire propage une onde EM qui se réfléchit sur les surfaces radiculaires et est détectée par le récepteur intégré. En mode transmission (b) et (c), une onde EM se propage dans une direction et son temps d'arrivée est détecté par un récepteur dans un forage adjacent (forage croisé) ou à la surface du sol (forage à surface) [Butnor et al., 2012].	56
3.1 Illustration des notions d'eau libre et d'eau liée dans le bois.	65
3.2 Composition de la racine selon sa teneur en eau. (* : Point Complètement Sec; ** : Point de Saturation Complet; *** : combinaison de tissus cellulaires et de l'eau liée absorbée).	65
3.3 Comparaison des modèles empiriques de Guo et al. [2013] et Hirano et al. [2012].	67
3.4 Évolution de la constante diélectrique de la racine en fonction de sa teneur en eau (gravimétrique) pour différents diamètres.	67
3.5 Évolution de la conductivité électrique de la racine en fonction de la teneur en eau.	68
3.6 B-scan avec réflexion hyperbolique de la racine (à gauche); et les différents indices du signal réfléchi (à droite) extraits du A-scan passant par le centre de la section de la racine (indiqué en pointillés sur l'image de gauche) (modifié de Hirano et al. [2009]).	69
3.7 Vue de coupe de l'environnement bidimensionnel simulé sur gprMax.	70
3.8 B-scans issus des mesures expérimentales au laboratoire. (a) racine détectable ($d = 3,5\text{cm}$; $\theta_v = 35\%$); (b) racine non-détectable ($d = 2\text{cm}$; $\theta_v = 10\%$).	71
3.9 Résultats du traitement des données de simulation pour deux exemples de racines. (a) racine détectable ($d = 3,5\text{cm}$; $\theta_v = 35\%$; intensité des pixels : 164), (b) racine non-détectable ($d = 2\text{cm}$; $\theta_v = 10\%$; intensité des pixels : 27).	71
3.10 Grille de détectabilité des racines selon leurs diamètres et teneurs en eau volumiques. La valeur indiquée dans chaque case correspond à la permittivité relative de la racine simulée. Les racines détectables sont désignées par des triangles remplis; celles indétectables par des triangles vides.	72
3.11 Modèle de ramification racinaire (A) dichotomique (B) à chevrons (Herringbone). Le numéro indiqué à côté de chaque branche désigne son ordre de ramification.	73
3.12 Principe de la règle de Leonardo, qui s'exprime mathématiquement par l'équation (3.9) (d'après Oppelt et al. [2001]).	74
3.13 La variation sinusoïdale de la surface d'amplitude maximale du signal réfléchi par la racine en fonction de l'angle d'orientation de celle-ci par rapport à la direction de mesure GPR.	75
3.14 Acquisition de données GPR sous forme de (a) grilles carrées; (b) grilles carrées avec des lignes diagonales.	75
3.15 Illustration du système de coordonnées spatiales nécessaire à la modélisation du problème d'orientation de la racine. (modifié de Liu et al. [2018])	76
3.16 Formation des hyperboles GPR pour différents angles d'orientation horizontales (α) de la racine et un angle d'orientation vertical fixe de $\beta = 0^\circ$.	77
3.17 Formation des hyperboles GPR pour différents angles d'orientation verticaux (β) de la racine et un angle d'orientation horizontal fixe de $\alpha = 60^\circ$.	77
3.18 Taille des particules du sol [Gee and Or, 2002].	79
3.19 Triangle textural pour l'identification et la classification des sols selon les pourcentages d'argile, limon et sable [Groenendyk et al., 2015].	79
3.20 La permittivité relative du sol modélisée par Topp et al. [1980] et CRIM pour un sol sableux. La porosité du sol et la permittivité de la matrice solide considérées sont de $\phi = 40\%$ et $\epsilon_s = 4,5$, respectivement.	82
3.21 Permittivité diélectrique en fonction de la fréquence (pour de l'eau libre pure à 25°C) illustrant le mécanisme de relaxation de Debye.	82

3.22 La partie réelle de la permittivité diélectrique calculée par le modèle de Peplinski pour un sol avec les propriétés suivantes : $S = 0,9$, $C = 0,1$, $\rho_a = 2 \text{ g/cm}^3$ et $\rho_s = 2,66 \text{ g/cm}^3$ et $f_w = 5\% - 25\%$ avec un pas de 5%. La plage de fréquence de notre application GPR pour la détection des racines est délimitée par les deux traits en rouge.	84
3.23 La partie imaginaire de la permittivité diélectrique calculée par le modèle de Peplinski pour un sol avec les propriétés suivantes : $S = 0,9$, $C = 0,1$, $\rho_a = 2 \text{ g/cm}^3$ et $\rho_s = 2,66 \text{ g/cm}^3$ et $f_w = 5\% - 25\%$ avec un pas de 5%. La plage de fréquence de notre application GPR pour la détection des racines est délimitée par les deux traits en rouge.	84
3.24 Similaire à la figure 3.22 avec $S = 0,1$ et $C = 0,9$	85
3.25 Similaire à la figure 3.23 avec $S = 0,1$ et $C = 0,9$	85
3.26 La permittivité relative du sol calculée pour la fréquence 900 MHz utilisant le modèle de Peplinski et al. [1995] et de Topp et al. [1980]. Les propriétés du sol sont : $\rho_a = 1 \text{ g/cm}^3$ et $\rho_s = 2,66 \text{ g/cm}^3$	86
3.27 Fractales bidimensionnelles pour différentes dimensions fractales D	88
3.28 Exemples de sols hétérogènes générés par les deux modèles : (à gauche) le modèle proposé : couche 1 : $N_1 = 200$; $\theta_v = [0 - 10\%]$; couche 2 : $N_2 = 150$; $\theta_v = [0 - 8\%]$; couche 3 : $N_3 = 100$; $\theta_v = [0 - 6\%]$, et (à droite) le modèle fractal : $N = 100$ matériaux, $D = 2$; $S = 0,9$; $C = 0,1$; $\theta_v = [0 - 10\%]$; $\rho_a = 2 \text{ g/cm}^3$; $\rho_s = 2,66 \text{ g/cm}^3$	89
3.29 B-scans résultants de la simulation gprMax en utilisant : le modèle proposé (à gauche), le modèle fractal (à droite).	89
4.1 Scénario considéré pour la démonstration.	96
4.2 B-scan brut de démonstration issu de la simulation du scénario de la figure 4.1.	97
4.3 Application de la correction du temps zéro au B-scan de la figure 4.2.	98
4.4 La ligne continue représente l'amplitude instantanée moyenne de l'ensemble des A-scans du scénario de démonstration. La ligne en pointillés est la fonction d'atténuation exponentielle estimée.	99
4.5 Application du gain exponentiel estimé par la méthode de la décroissance d'amplitude inverse.	99
4.6 B-scan initial après soustraction de la moyenne.	100
4.7 Les valeurs singulières correspondantes au B-scan initial.	101
4.8 Réduction du clutter par la décomposition en valeurs singulières. Le couplage entre les antennes et la réflexion de la surface du sol sont éliminées avec la première valeur singulière. L'impact de la nature hétérogène du sol est atténué avec les deuxième et troisième valeurs singulières.	102
4.9 Comparaison du A-scan central après application de l'approche SVD.	103
4.10 B-scan initial après suppression des trois premières valeurs singulières et application du gain temporel.	103
4.11 Illustration d'un profil GPR collecté par la configuration PMC.	104
4.12 Application d'opérateur de Canny pour la détection des contours dans le cas du B-scan initial.	107
4.13 Processus de formation de la réflexion hyperbolique d'une racine par GPR.	108
4.14 Organigramme de l'algorithme RHT pour l'estimation des paramètres de l'hyperbole.	108
4.15 (a) Sélection de la région d'intérêt (ROI), (b) sélection de trois points aléatoires appartenant à l'hyperbole de la région d'intérêt, et (c) en ligne rouge le résultat du raccordement de l'hyperbole par la méthode RHT.	109
4.16 Résultats de l'estimation de la permittivité relative du sol par la méthode RHT. Chaque cercle bleu correspond à une simulation réalisée.	110
4.17 Illustration des propriétés du filtrage adapté appliqué au niveau de la chaîne de réception du système GPR.	111
4.18 Scénario de collection du signal SAR.	113

4.19 Snapshots montrant le processus de correction des positions des hyperboles par rétro-propagation du filtrage adapté.	114
4.20 Application de la transformée d'Hilbert au résultat du filtrage adapté. Les cercles en rouge représentent les positions exactes des trois racines.	114
4.21 Modèles de racines : (a) modèle de forme Y, et (b) modèle de forme Z.	115
4.22 Modèle de sol hétérogène utilisé dans la simulation 3-D.	115
4.23 Le modèle racinaire dichotomique proposé.	116
4.24 Vue de dessus du scénario de simulation 3-D. Le modèle racinaire est enfoui à 15 cm de profondeur dans le sol hétérogène.	117
4.25 Résultat du post-traitement du B-scan provenant de (a) la partie inférieure ($y = 0,5 m$), et (b) la partie supérieure ($y = 0,1 m$) de la racine de forme Y. Les cercles en rouge représentent les positions exactes des racines.	117
4.26 La reconstruction tridimensionnelle de l'architecture du modèle racinaire de forme Y.	118
4.27 La reconstruction tridimensionnelle de l'architecture du modèle racinaire de forme Z.	118
4.28 La reconstruction tridimensionnelle de l'architecture du modèle racinaire dichotomique par la chaîne de post-traitement proposée.	119
5.1 Système de mesures GPR au laboratoire. Dimensions du bac : longueur = 100 cm, largeur = 60 cm, hauteur = 40 cm.	127
5.2 Comparaison entre les spectres des systèmes SFCW et impulsif.	127
5.3 Description de la conception de l'antenne papillon complémentaire fractale.	128
5.4 (a) Antennes d'émission et de réception utilisées pour réaliser nos mesures au laboratoire, et (b) le coefficient de réflexion mesuré de nos antennes Tx et Rx.	129
5.5 Les deux prototypes racinaires considérés pour les expérimentations au laboratoire. Pour le prototype A, les diamètres des trois segments sont comme suit : $d_a = 1,9$ cm ; $d_b = 1,5$ cm ; $d_c = 1$ cm.	129
5.6 Mesures des propriétés diélectriques des prototypes racinaires.	130
5.7 Résultat des B-scans mesurés en laboratoire : partie supérieure du prototype A ($y = 0,35$ m) à droite, et partie inférieure ($y = 0,10$ m) à gauche. (a) Après pré-traitement et réduction du clutter par la SVD, et (b) après focalisation par le filtrage adapté et la transformée d'Hilbert.	131
5.8 Application de l'approche RHT aux données mesurées en laboratoire. (a) Une version de l'image B-scan en niveaux de gris est considérée, (b) conversion en une image binaire après extraction des bords à l'aide de l'opérateur de Canny, (c) la ROI contenant l'hyperbole d'intérêt est sélectionnée pour le traitement RHT, et (d) raccordement de l'hyperbole via les valeurs médianes des trois paramètres estimés.	131
5.9 C-scans des deux prototypes considérés dans les expérimentations au laboratoire : (a) prototype A, (b) prototype B.	132
5.10 Visualisation en 3-D du C-scan du prototype A.	132
5.11 Visualisation en 3-D du C-scan du prototype B.	133
5.12 Équipements du système GPR MALÅ GX750HDR.	134
5.13 Réduction du bruit aléatoire et augmentation du SNR par l'empilement des signaux GPR en collectant la même trace plusieurs fois, en calculant la moyenne et en enregistrant la trace moyenne.	135
5.14 Effet de la réduction du niveau de bruit sur le spectre GPR.	136
5.15 Vue satellite montrant la localisation du site de mesures au sein du campus de CentraleSupélec (source : Google Earth). L'arbre étudié est situé entre les bâtiments Bouygues et Breguet.	138
5.16 Collection des données GPR sur le terrain à l'aide du système MALÅ GX750HDR.	139
5.17 Plan de mesures GPR centré autour du tronc de l'arbre étudié. Les lignes horizontales et verticales correspondent aux parcours des B-scans collectés.	139
5.18 Exemple de post-traitement d'un B-scan collecté dans la zone B par le système MALÅ.	140
5.19 Position des arbres voisins (de 1 à 4) par rapport à l'arbre étudié (A).	141

5.20	Résultat de la reconstruction de l'architecture racinaire de l'arbre étudié à une profondeur de 10 cm (zones B et D) via la chaîne de post-traitement GPR proposée. . .	142
5.21	Résultat de la reconstruction de l'architecture racinaire de l'arbre étudié à une profondeur de 10 cm (zones A et C) via la chaîne de post-traitement GPR proposée. . .	142
C.1	Effets des facteurs limitant la détection des racines par GPR sur le signal de sortie. . .	146

Liste des tableaux

1	Tableau récapitulatif des objectifs traités dans les principales publications de cette thèse.	xix
1.1	Valeurs typiques des caractéristiques EM des matériaux à la fréquence de 100 MHz [Cassidy, 2009]. ϵ_r = permittivité relative, σ = conductivité électrique, v = vitesse de propagation et α = atténuation.	8
1.2	Liste des principales sociétés du monde entier qui fabriquent des systèmes GPR pour une large gamme d'applications de géophysique et d'ingénierie.	15
2.1	Tableau comparatif des méthodes non-destructives pour l'étude des systèmes racinaires.	51
2.2	Les profondeurs et résolutions des systèmes GPR à différentes fréquences utilisées pour la détection des racines dans divers types de sols.	54
3.1	Résumé des paramètres de la simulation.	70
3.2	Densités apparentes des sols [Nawaz et al., 2013].	80
3.3	Temps nécessaires à la simulation gprMax faisant appel aux deux modèles de sol hétérogène. Calculs effectués sur un ordinateur équipé d'un processeur Intel Xeon 3,80 GHz et d'une RAM de 64 Go.	90
4.1	Coordonnées spatiales des racines simulées estimées par l'approche RHT.	109
4.2	Diamètres et longueurs des segments du modèle racinaire dichotomique.	116
4.3	Résultats de la simulation numérique sur la section transversale du modèle racinaire à $y = 0,60$ m impliquant six types de sol différents. $\hat{\epsilon}_r$ représente la permittivité diélectrique du sol estimée à l'aide de l'approche RHT.	120
5.1	Résumé des paramètres clés du VNA utilisé dans les expérimentations au laboratoire.	128
5.2	Principales caractéristiques de l'antenne GX750HDR du système GPR MALÅ.	134
5.3	La relation entre le niveau de bruit et le nombre de piles utilisées.	136
5.4	Caractéristiques des B-scans collectés dans le cadre de nos mesures terrain.	138
A.1	Formules utilisées pour calculer la fraction volumique de chaque inclusion de la racine.	149

Introduction générale

A – Mise en contexte et problématique

Retrouvé en 2007 à l'État de New York aux États-Unis, le plus ancien arbre fossile identifié date de plus de 385 millions d'années¹. Les arbres et les forêts ont toujours fait partie de la vie sur la planète Terre. Par conséquent, ils doivent être entretenus et traités avec soin. De nos jours, on note une croissance dans la prise de conscience de la nécessité de protéger l'environnement. Dans ce sens, empêcher la destruction des arbres -qui sont coupés aujourd'hui à un rythme alarmant pour créer de la richesse sous différentes formes- est vital pour la préservation de la vie, tant pour les humains que pour les animaux. Ainsi, une gestion et un entretien appropriés du patrimoine naturel s'imposent aujourd'hui plus que jamais.

Parmi tous les organes de l'arbre, les racines sont d'une importance vitale car elles ont des fonctions cruciales pour les arbres et les écosystèmes : elles assurent l'ancrage de l'arbre, absorbent l'eau et les nutriments, stockent le carbone et modifient les propriétés du sol environnant. Cependant, même si les racines représentent entre 10 et 65% de la biomasse totale d'un arbre, elles se trouvent généralement sous la surface du sol, ce qui limite notre compréhension du développement du système racinaire et de son interaction avec le sol. De plus, les conditions du terrain, le type et la structure du sol, la teneur en eau et en minéraux et d'autres facteurs sont responsables du développement de la structure racinaire de l'arbre.

Dans ce contexte, l'étude des systèmes racinaires des arbres (leur croissance, architecture, leurs interactions avec le sol, etc.), et l'estimation des paramètres liés aux racines (taille, biomasse, densité, etc.) est d'une importance capitale. D'un côté, dans le contexte du génie civil, cela permettra de comprendre et réduire les interactions entre les arbres et les infrastructures souterraines, surtout en milieu urbain. D'ailleurs, les racines des arbres sont à même d'appliquer des pressions radiales non négligeables (jusqu'à $8 \times 10^5 \text{ N/m}^2$) qui finissent souvent par endommager les trottoirs, les canalisations et les murs des bâtiments voisins. D'un autre côté, dans le contexte du changement climatique, une concentration élevée de CO_2 combinée à des changements rapides et accélérés de l'utilisation des terres est connue pour avoir des impacts sur la durabilité des écosystèmes. La biomasse des racines ligneuses, un élément crucial du bilan carbone de l'écosystème terrestre, a été testée pour corrélérer positivement avec une concentration élevée de CO_2 . Par voie de conséquence, une bonne compréhension de la biomasse racinaire et des facteurs qui la régulent est essentielle pour prédire l'impact du changement climatique sur la dynamique mondiale du carbone.

Traditionnellement, le système racinaire est étudié à travers des méthodes destructives (telles que l'excavation et le déracinement), qui sont directes mais laborieuses et chronophages, limitant ainsi le nombre d'échantillons mesurés et la répétabilité des mesures. De plus, ces méthodes introduisent des perturbations externes à l'environnement et/ou détruisent les systèmes racinaires si cela n'est pas fait correctement, ce qui rend les mesures répétées à long terme inexactes voire impossibles. Avec l'utilisation de ces méthodes d'inspection, les systèmes racinaires deviennent très sensibles aux infections et aux maladies qui peuvent entraîner la mort de l'arbre. Aussi, des efforts considérables ont été déployés pour développer des méthodes d'analyse non destructives

1. <https://www.sciencedaily.com/releases/2019/12/191219142820.htm>

au cours des deux dernières décennies. Les méthodes non destructives développées sont basées sur différents principes (optique, acoustique, électromagnétique, ...) et permettent des mesures continues et à long terme des racines avec un minimum de perturbations.

Le radar à pénétration de sol (ou [Ground Penetrating Radar \(GPR\)](#)), une technique géophysique largement employée pour localiser des objets souterrains (nappes phréatiques, mines, tuyaux, câbles, et autres) est, depuis 1999, de plus en plus utilisé pour l'imagerie des systèmes racinaires d'arbres. Récemment, plusieurs études ont été menées sur l'utilisation du [GPR](#) pour la détection et la cartographie des racines, ainsi que pour l'estimation de la biomasse. Cette technologie a montré un grand potentiel en raison de la fiabilité des résultats et de sa facilité d'utilisation. Cependant, son emploi n'a pas toujours été réussi en raison de la multitude des facteurs qui entravent la détection des racines par [GPR](#). A titre d'exemple, la teneur en eau est un facteur fondamental et déterminant dans la détection de la racine.

De là, il s'avère nécessaire d'acquérir des connaissances approfondies sur les systèmes racinaires des arbres afin d'adapter l'utilisation du [GPR](#) à notre application et mieux interpréter les résultats obtenus. La simulation représente un outil pédagogique puissant et incontournable qui aide à comprendre le comportement des ondes [électromagnétiques \(EM\)](#) au sein d'un milieu de propagation. Dans le cadre de notre travail, la simulation nous permettra plus particulièrement d'évaluer l'impact des principaux facteurs qui limitent la détection des racines par [GPR](#). Toutefois, il sera nécessaire de disposer de modèles réalistes de sol et de racines afin de modéliser le plus fidèlement possible le scénario étudié.

Un autre défi parmi les plus importants dans ce contexte, est l'impact de l'hétérogénéité du sol sur la qualité des données [GPR](#). En effet, lorsque le [GPR](#) est utilisé pour l'inspection des racines d'arbres (de petite échelle par rapport à la longueur d'onde λ), des fréquences élevées sont souvent employées afin d'obtenir une résolution suffisante dans le sol. Or le [GPR](#) devient plus sensible à l'hétérogénéité naturelle du sol lorsqu'une haute fréquence est utilisée. En réalité, l'hétérogénéité du sol disperse les ondes [EM](#) émises par l'antenne [GPR](#), et les ondes diffusées sont en partie vues comme des réflexions indésirables contribuant ainsi à ce que l'on appelle le "clutter". Les données contenant une grande quantité de clutter sont difficiles à analyser et à interpréter car ce dernier entrave la visibilité des réflexions issues des objets d'intérêt. De manière générale, le terme clutter inclut trois principales composantes :

- les réflexions indésirables des autres objets présents dans le sol ;
- la réflexion provenant de l'interface air-sol ;
- le couplage entre les antennes émettrice et réceptrice.

En ce qui concerne les techniques de traitement des données [GPR](#) collectées sur le terrain, les chercheurs utilisent très souvent des logiciels comme "ReflexW", "GPRslice" ou "matGPR" qui font appel à un ensemble de techniques classiques dans les traitements [GPR](#) (soustraction de la moyenne, migration de Kirchhoff, ...). Cependant, la performance de ces méthodes devient limitée lorsque l'hétérogénéité du sol rentre en jeu. D'où l'importance de développer des techniques de post-traitement plus puissantes, et qui permettent d'une part un degré de liberté plus important dans la réduction du clutter, et d'autre part, un meilleur rapport signal à bruit à la fin du traitement.

La reconstruction tridimensionnelle des architectures racinaires est un autre aspect qui suscite de plus en plus l'intérêt des chercheurs d'aujourd'hui. Cet intérêt repose sur le fait que la structure topologique des racines et leur dynamique de croissance sont des indicateurs clés de la réponse des arbres aux stress environnementaux. En réalité, les racines s'adaptent progressivement aux changements des conditions environnementales, et les différentes architectures de systèmes racinaires observées dans la nature reflètent l'adaptation aux conditions locales et entraînent un fonctionnement différent. D'où l'intérêt de développer des outils de surveillance de la croissance spatio-temporelle des structures racinaires.

La travail mené dans cette thèse s'inscrit dans ces enjeux et a pour vocation de proposer à la communauté scientifique un outil complet d'imagerie des systèmes racinaires par **GPR** capable de :

1. aider les arboristes à mieux comprendre le processus du développement racinaire des arbres ;
2. déterminer la densité et la profondeur des racines pour évaluer la stabilité des arbres ;
3. établir la cartographie racinaire afin d'aider à trouver le meilleur emplacement des tuyaux et réservoirs souterrains qui minimise les dommages aux racines des arbres existants ;
4. déterminer la localisation et la distribution des racines des arbres remarquables ou protégés dont l'excavation n'est pas possible ;
5. aider à déterminer l'emplacement des piliers de construction entre les systèmes de racines pour la construction de fondations ou de murs de soutènement ;
6. évaluer la densité racinaire à des intervalles de temps appropriés afin de reconnaître les maladies ou les attaques fongiques des racines à un stade précoce et ainsi prendre les mesures correctives nécessaires pour sauver l'arbre.

Il est donc clair que les travaux de cette thèse sont d'une utilité concrète pour un large spectre de thèmes allant de l'ingénierie du génie civil, à la préservation de l'écosystème terrestre à travers le contrôle de la santé des arbres et des plantes.

B – Structure de la thèse, objectifs et contributions

Outre cette introduction générale qui expose la problématique de la thèse, ce manuscrit s'articulera autour de cinq chapitres :

- Le *chapitre 1* rappelle brièvement les bases de l'électromagnétisme nécessaires à la compréhension de la manière dont les mesures **GPR** permettent d'étudier et de rendre compte des variations des propriétés **EM** du sol étudié. Le logiciel de simulation utilisé dans cette thèse étant basé sur la méthode des différences finies, une description rapide du principe de cette méthode populaire sera fournie. Ensuite, l'histoire de la technique **GPR**, son principe de fonctionnement et ses différentes technologies et configurations seront présentées. Un focus sera fait sur la partie antennaire du système **GPR**, pour enfin conclure par un bref aperçu sur le logiciel de simulation gprMax et ses principales fonctionnalités.
- Le *chapitre 2* est dédié à l'analyse du système racinaire des arbres, sa fonction, son architecture, les problèmes qu'il cause à son environnement et le rôle qu'il joue dans l'écosystème terrestre global. Ce chapitre est d'une importance capitale pour comprendre le cœur des motivations de ce travail de thèse. Il présente également une étude comparative des différentes techniques qui permettent d'étudier le système racinaire, et les classifie en deux catégories : destructives et non-destructives. Un état de l'art détaillé sur l'utilisation du **GPR** pour l'imagerie du système racinaire sera présenté, avant de conclure sur la viabilité de cette technologie pour la cartographie des racines et l'estimation de leurs paramètres clés (diamètre, biomasse, etc.).
- Le *chapitre 3* se consacrera à l'analyse des principaux facteurs qui limitent la détection des racines par **GPR**. Pour cela, les modèles diélectriques et géométriques employés pour simuler le système racinaire seront d'abord présentés. Ensuite, l'impact de la nature du sol sur la croissance et le développement des racines sera introduit. De plus, des modèles diélectriques de sol ainsi que des modèles permettant de définir une distribution hétérogène de sol seront d'abord décrits puis comparés. Ce chapitre présentera également l'approche suivie et les résultats obtenus d'une étude paramétrique réalisée pour évaluer l'impact simultané du diamètre et de la teneur en eau des racines sur leur détectabilité par **GPR**. Les conclusions tirées de cette étude seront utiles pour guider nos mesures expérimentales au laboratoire.

- Le *chapitre 4* présentera les détails de la chaîne de post-traitement proposée dans le but de reconstruire l'architecture tridimensionnelle des racines à partir des données [GPR](#). La chaîne développée repose essentiellement sur la technique de la décomposition en valeurs singulières pour la réduction du clutter, la transformée de Hough pour extraire la permittivité relative du sol, et une technique de migration de type [Synthetic Aperture Radar \(SAR\)](#), basée sur la combinaison du filtrage adapté et la transformée d'Hilbert. Sachant que la méthode proposée s'appuie sur la réflexion hyperbolique provoquée par la racine pour déduire l'information nécessaire sur le sol, elle devient particulièrement intéressante dans le cas des sols hétérogènes, dont la détermination des propriétés diélectriques est souvent très compliquée. Pour valider la procédure, ce chapitre présentera également des illustrations d'architectures de modèles racinaires simulés sur gprMax, avant et après application du traitement proposé.
- Le *chapitre 5* sera consacré à la partie mesures de cette thèse. Il consistera en deux grandes parties : mesures expérimentales dans un environnement contrôlé (au laboratoire) et mesures sur un arbre réel (sur le terrain). Le système du laboratoire permettant de réaliser des mesures en domaine fréquentiel sur des prototypes racinaires en bois sera d'abord présenté. En particulier, une description des caractéristiques des antennes employées sera fournie. Ensuite, la chaîne de post-traitement du *chapitre 4* sera validée sur les prototypes racinaires dont les architectures tridimensionnelles seront reconstruites avec un degré de résolution acceptable. Dans un deuxième temps, ce chapitre présentera le système radar MALÅ utilisé pour conduire les mesures sur le terrain. L'apport de la technologie [High Dynamic Range \(HDR\)](#) sera expliqué. De plus, des directives pratiques concernant la conduite des mesures sur les arbres réels avec un système [GPR](#) seront données au cours de ce chapitre. Enfin, les résultats des mesures terrain et du traitement appliqué seront présentés et analysés.

Une conclusion générale clôture enfin le manuscrit et des perspectives sont recensées.

Cette thèse a fait l'objet de divers travaux écrits (voir liste des publications). Le tableau [1](#) récapitule les objectifs traités dans les trois principales productions.

Ces objectifs ont été atteints et nos contributions spécifiques peuvent être résumées comme suit :

1. Catégorisation et évaluation des facteurs qui limitent la détection des racines par [GPR](#) en se basant sur des simulations numériques et des mesures expérimentales sur des racines réelles.
2. Établissement d'un protocole de simulation du système {sol + racines} entièrement basé sur des modèles [EM](#) et géométriques réalistes en adaptant leurs variables d'entrée à gprMax-3D, le simulateur le plus utilisé de nos jours par la communauté [GPR](#).
3. Développement d'une chaîne de post-traitement de données [GPR](#) sur MATLAB capable de reconstruire l'architecture tridimensionnelle du système racinaire sans aucune information *a priori* sur le sol environnant.
4. Test et validation de la chaîne de post-traitement proposée sur des données de simulation, de mesures dans un environnement contrôlé, et enfin sur des données collectées sur le terrain par un radar MALÅ doté de la technologie [HDR](#).

TABLEAU 1 – Tableau récapitulatif des objectifs traités dans les principales publications de cette thèse.

Publication	Objectif 1 ^a	Objectif 2 ^b	Objectif 3 ^c	Objectif 4 ^d
Papier 1 : « Impact of root diameter and water content on tree roots detection using ground penetrating radar », in Proceeding of <i>The 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP2019)</i> , IEEE explore, 8739825, ISBN 978-88-907018-8-7, pp. 1–5, Mars/Avril 2019, Cracovie, Pologne.	Principal	Secondaire	Secondaire	—
Papier 2 : « 3D Reconstruction of Tree Roots under Heterogeneous Soil Conditions using Ground Penetrating Radar », in Proceeding of <i>The 10th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar - IWAGPR 2019 (Near Surface Geoscience)</i> , doi :10.3997/2214-4609.201902596, Vol. 2019, pp. 1-5, septembre 2019, La Haye, Pays-Bas.	—	Principal	—	Secondaire
Papier 3 : « A Processing Framework for Tree-Root Reconstruction using Ground-Penetrating Radar under Heterogeneous Soil Conditions », <i>IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Early Access</i> , doi :10.1109/TGRS.2020.2993719, pp. 1-12, (en ligne) mai 2020.	—	Principal	Secondaire	Secondaire

^a Objectif 1 : Déterminer et évaluer les facteurs qui limitent la détection des racines par [GPR](#).

^b Objectif 2 : Développer des méthodes de traitement de données visant à extraire le maximum d'informations à partir des données collectées par [GPR](#).

^c Objectif 3 : Conduire des mesures dans un environnement contrôlé pour appuyer et valider les résultats obtenus avec les données synthétiques.

^d Objectif 4 : Prendre en compte l'effet de l'hétérogénéité du sol afin de simuler des environnements plus réalistes.

Chapitre 1

Bases de l'électromagnétisme et principe du GPR

« Radar is used to extend the capability of one's senses for observing the environment, especially the sense of vision. The value of radar lies not in being a substitute for the eye, but in doing what the eye cannot do. »

Merrill Skolnik

Sommaire

1.1 Introduction	2
1.2 Rappels d'électromagnétisme	2
1.2.1 Principe de propagation des ondes EM	2
1.2.1.1 Caractéristiques des matériaux	2
1.2.1.2 Propagation et atténuations des ondes EM	5
1.2.2 La méthode FDTD	8
1.2.2.1 Présentation de la méthode	8
1.2.2.2 Contraintes numériques de la méthode	11
1.3 Aperçu sur le logiciel de simulation gprMax	11
1.4 Principe du GPR	14
1.4.1 Histoire et applications	14
1.4.2 Marché du GPR	15
1.4.3 Bilan de liaison	16
1.4.4 Principe de fonctionnement du GPR	16
1.4.5 Les différents types de GPR	18
1.4.6 Collection de données	20
1.4.7 Résolution d'un système GPR	22
1.4.8 Configurations GPR	23
1.4.9 Antennes GPR	25
1.4.9.1 Principales caractéristiques d'antenne	25
1.4.9.2 Principaux types d'antennes GPR	28
1.5 Conclusion	30

1.1 Introduction

Le radar à pénétration de sol est un système de prospection géophysique basé sur la propagation des ondes EM dans un milieu. Ce chapitre a pour but d'introduire succinctement les notions nécessaires à la compréhension du principe du GPR. Dans la première partie, sont présentées les notions de l'électromagnétisme, notamment les principes de propagation des ondes EM et leur interaction avec les milieux auscultés en fonction de leurs propriétés diélectriques. Ensuite, le principe de la méthode des différences finies (Finite Difference Time Domain (FDTD)) qui sera utilisée pour effectuer les simulations numériques tout au long de cette thèse est brièvement décrit.

Dans la seconde partie de ce chapitre, le GPR est présenté comme un outil d'imagerie prometteur pour les investigations souterraines. Son principe de fonctionnement est d'abord rappelé, ensuite les différentes technologies GPR (impulsionnel et à saut de fréquences) sont décrites. Les deux types de technologies sont utilisées dans le cadre de cette thèse. De plus, les termes communément utilisés (A-scan, B-scan, C-scan) sont expliqués et les différentes configurations antennes utilisées pour réaliser les scans GPR sont discutées.

Par la suite, nous présentons les caractéristiques des antennes ainsi qu'une vue générale des différentes solutions disponibles en matière d'antennes large bande destinées aux applications GPR. Cela nous conduira à définir les critères de choix de l'antenne qui sera utilisée pour la réalisation de nos mesures au laboratoire. Finalement, une présentation de l'outil gprMax sur lequel seront réalisées les simulations numériques de ce travail est fournie. Les principales fonctionnalités de gprMax sont rapidement décrites.

1.2 Rappels d'électromagnétisme

1.2.1 Principe de propagation des ondes EM

En fonction des propriétés EM du sol, les ondes s'y propagent de manières différentes (vitesse, réflexion, atténuation, etc.) selon la nature de ses constituants, sa teneur en eau, sa porosité, etc. En réalité, les propriétés EM des milieux naturels peuvent être très complexes, notamment du fait de leur forte hétérogénéité.

Il est donc important de comprendre la physique des propriétés électriques et magnétiques des matériaux et comment ces propriétés se rapportent à l'atténuation du signal GPR et à la vitesse de propagation des ondes EM [Annan, 2005; Cassidy, 2009; Daniels, 2005].

1.2.1.1 Caractéristiques des matériaux

Les propriétés diélectriques décrivent le comportement de la matière sous l'influence du champ EM. Cela englobe la conductivité électrique, la permittivité électrique et la perméabilité magnétique. Les équations de cette section seront exprimées en régime harmonique (convention $e^{i\omega t}$).

* Conductivité électrique

La conductivité électrique (σ) est la capacité d'un matériau à laisser passer et conduire le courant électrique. La conductivité relie le champ électrique à la densité de courant de conduction (\vec{J}_c). Elle est donnée par l'équation (1.1) qui caractérise la loi d'Ohm.

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad (1.1)$$

où \vec{J}_c est la densité surfacique de courant induit ($A.m^{-2}$), σ la conductivité électrique ($S.m^{-1}$), et \vec{E} le champ électrique appliqué ($V.m^{-1}$).

Dans les sols, les principaux porteurs de charges sont les ions (anions et cations) présents dans la solution électrolytique du sol (Na^+ , K^+ , NO_3^- ...). La conductivité électrique est principalement influencée par la porosité du sol et sa teneur en eau.

La conductivité est une grandeur physique complexe :

$$\sigma = \sigma' - i\sigma'' \quad (1.2)$$

Elle comprend une composante en phase (partie réelle σ') et une composante hors phase (partie imaginaire σ''). La partie réelle est une mesure de la force avec laquelle un matériau supporte le flux d'un courant électrique, elle est considérée comme une constante indépendante de la fréquence. En revanche, l'introduction d'une partie imaginaire montre que le matériau ne réagit pas instantanément à l'action d'un champ électrique. La partie imaginaire de la conductivité est généralement négligeable aux fréquences radar et dans les sols diélectriques.

* **Permittivité diélectrique**

La permittivité (ϵ) décrit la capacité d'un matériau à stocker et libérer l'énergie EM sous forme de charge électrique. En effet, lorsqu'on soumet un matériau diélectrique (*i.e.*, un matériau isolant, sans charges électriques libres) à un champ électrique \vec{E} , les charges électriques liées se déplacent très légèrement de leur position d'équilibre naturel vers une nouvelle position en équilibre avec le champ appliqué. C'est le phénomène de *polarisation* du matériau.

Lorsqu'on arrête d'appliquer le champ électrique, les charges liées retournent à leurs positions d'équilibre originelles en libérant de l'énergie. C'est le phénomène de *relaxation*. Le phénomène de polarisation correspond à un stockage d'énergie au sein du matériau, et celui de relaxation à une libération d'énergie.

Le léger déplacement des charges liées au sein du matériau crée un moment dipolaire (\vec{D}) en réaction à l'application du champ électrique. La relation entre un champ électrique appliqué et le moment dipolaire est donnée par (1.3).

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1.3)$$

où \vec{D} est l'induction électrique en ($C.m^{-2}$) et ϵ la permittivité diélectrique ($F.m^{-1}$).

La loi de conservation des charges permet d'aboutir à l'équation (1.4) exprimant les courants de déplacement (\vec{J}_d) en fonction du champ électrique :

$$\vec{J}_d = \epsilon i\omega \vec{E} \quad (1.4)$$

A l'image de la conductivité, la permittivité diélectrique est une grandeur complexe, dépendante de la fréquence, avec des composantes réelle et imaginaire, s'écrivant comme suit :

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (1.5)$$

où ϵ' est la partie réelle (énergie stockée dans le milieu) et ϵ'' est la partie imaginaire (énergie dissipée dans le milieu). Le signe - précédant la partie imaginaire est lié à la convention du régime harmonique adoptée dans ce rapport et traduit la notion de pertes.

La partie réelle de la permittivité complexe décrit le transfert d'énergie et mesure la capacité du milieu à se polariser sous l'effet du champ incident. La partie imaginaire est liée à la dispersion et aux pertes d'énergie électrique dans le matériau dues au phénomène de polarisation. Généralement, cette quantité est directement proportionnelle à la conductivité et ne peut pas être négligée aux fréquences radar.

* Perméabilité magnétique

La perméabilité magnétique traduit la réaction d'un matériau soumis à l'action d'un champ magnétique présent, ou autrement, sa faculté à modifier les lignes de flux magnétique. En absence de sources externes et dans le vide, la relation entre l'induction magnétique (\vec{B}) et le champ magnétique (\vec{H}) est donnée par (1.6) :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (1.6)$$

où μ_0 est la perméabilité magnétique du vide ($4\pi 10^{-7} \approx 1,26 \times 10^{-6} \text{H.m}^{-1}$).

La perméabilité est reliée à l'énergie stockée ou perdue dans le milieu diélectrique suite aux phénomènes d'induction magnétique. Généralement, l'aimantation induite est très faible et n'a que peu d'influence sur la propagation des ondes EM. La plupart des matériaux naturels sont peu magnétiques et leurs perméabilités sont proches de celle du vide μ_0 .

Cependant, les minéraux ferromagnétiques (comme le fer ou le nickel) peuvent avoir un effet non négligeable sur la propagation des ondes GPR et l'atténuation du signal. On définit une perméabilité magnétique relative pour caractériser un matériau :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.7)$$

* Courant total et paramètres effectifs

La densité de courant totale \vec{J}_t (A.m^{-2}) est définie comme la somme de la densité de courant de conduction et de la densité de courant de déplacement. Ainsi, avec une dépendance temporelle en $e^{i\omega t}$ on obtient :

$$\begin{aligned} \vec{J}_t &= \vec{J}_c + \vec{J}_d \\ \vec{J}_t &= \sigma \vec{E} + \epsilon i\omega \vec{E} \\ \vec{J}_t &= \{(\sigma' + \omega\epsilon'') + i(\sigma'' + \omega\epsilon')\} \vec{E} \\ \vec{J}_t &= \left\{ \left(\epsilon' + \frac{\sigma''}{\omega} \right) - i \left(\epsilon'' + \frac{\sigma'}{\omega} \right) \right\} i\omega \vec{E} \end{aligned} \quad (1.8)$$

où ω [rad/s] est la pulsation ou la fréquence angulaire.

Dans cette écriture, on ne fait plus la distinction entre les courants de conduction et les courants de déplacement. Cette représentation montre que la partie imaginaire de la permittivité joue le rôle d'une conductivité, et que la partie imaginaire de la conductivité joue le rôle d'une permittivité. On définit alors les notions de permittivité effective ϵ_e [F/m] et de conductivité effectives σ_e [S/m] :

$$\begin{aligned} \vec{J}_t &= \sigma_e \vec{E} \\ \vec{J}_t &= \epsilon_e i\omega \vec{E} \end{aligned} \quad (1.9)$$

avec :

$$\sigma_e = \underbrace{(\sigma' + \omega\epsilon'')}_{\sigma'_e} + i \underbrace{(\sigma'' + \omega\epsilon')}_{\sigma''_e} \quad (1.10)$$

et :

$$\epsilon_e = \underbrace{\left(\epsilon' + \frac{\sigma''}{\omega} \right)}_{\epsilon'_e} - i \underbrace{\left(\epsilon'' + \frac{\sigma'}{\omega} \right)}_{\epsilon''_e} \quad (1.11)$$

Du point de vue expérimental, on ne sait quantifier que les paramètres effectifs par le biais de la mesure de la composante en phase ou en quadrature de phase du courant total. Cela veut dire qu'il est impossible expérimentalement de différencier les contributions de σ' et ϵ'' d'une part, et de σ'' et ϵ' d'autre part pour une fréquence donnée.

Par la suite, on admettra que la participation de la partie imaginaire de la conductivité ($\frac{\sigma''}{\omega}$) est nulle, ce qui est le cas pour la plupart des matériaux aux fréquences GPR. Avec cette hypothèse on obtient :

$$\varepsilon'_e = \varepsilon' \quad (1.12)$$

Classiquement, pour caractériser un matériau on utilise la permittivité relative ε_r (dite aussi constante diélectrique). Il s'agit d'une grandeur sans dimension, liée à la partie réelle de la permittivité effective par l'équation :

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon_0} \quad (1.13)$$

avec ε_0 est la permittivité diélectrique du vide ($1/36\pi 10^{-9} \approx 8,854 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$).

À noter que tout au long de ce rapport, les valeurs numériques de permittivité diélectrique seront toutes exprimées de manière relative par rapport à la permittivité du vide.

La permittivité relative est un indicateur de la vitesse à laquelle l'énergie EM se propage à travers un matériau. Plus la permittivité est élevée, plus l'onde radar se déplace lentement dans le milieu.

Enfin, le rapport entre la partie imaginaire et la partie réelle de la permittivité complexe est défini par la «tangente de perte» comme :

$$\tan(\delta) = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \approx \frac{\sigma'}{\omega \varepsilon'} \quad (1.14)$$

La quantité $\tan(\delta)$ est une mesure de la quantité d'énergie dissipée lors de la propagation de l'onde EM dans le milieu considéré. Ainsi, lorsque cette valeur est nulle, le milieu en question ne présente pas de pertes.

1.2.1.2 Propagation et atténuations des ondes EM

Les lois fondamentales régissant l'électromagnétisme permettent de comprendre les mécanismes de propagation dans le sol. Nous rappelons les équations de Maxwell qui décrivent les variations spatiales et temporelles des champs électrique et magnétique ainsi que leur interdépendance [Giannopoulos, 1997] :

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad \text{Maxwell-Gauss} \quad (1.15a)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Maxwell-Thomson} \quad (1.15b)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -i\omega \vec{B} \quad \text{Maxwell-Faraday} \quad (1.15c)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 (\vec{J}_c + \vec{J}_s + \varepsilon i\omega \vec{E}) \quad \text{Maxwell-Ampère} \quad (1.15d)$$

où ∇ représente l'opérateur différentiel Nabla, \vec{J}_s la densité (source) de courant électrique (en A.m^{-2}) et ρ la densité volumique de charge (en C.m^{-3}).

Pour une onde plane en régime harmonique et en absence de sources, on montre que les équations d'ondes s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} \nabla^2 \vec{E} - \gamma^2 \vec{E} = 0 \\ \nabla^2 \vec{B} - \gamma^2 \vec{B} = 0 \end{cases} \quad (1.16)$$

où γ est la constante de propagation qui s'exprime comme :

$$\gamma = \sqrt{i\omega\mu(\sigma + i\omega\varepsilon)} \quad (1.17)$$

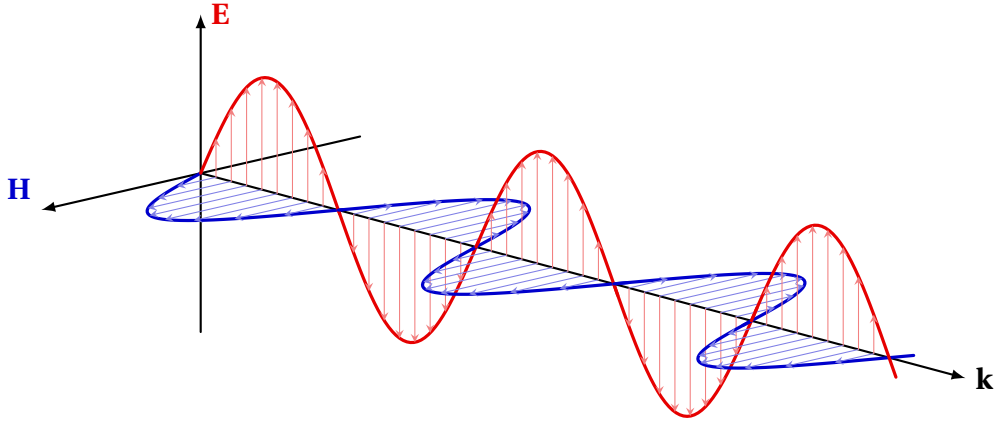


FIGURE 1.1 – Propagation d’une onde EM en champ lointain (mode TEM). Le champ électrique E, le champ magnétique B et la direction de propagation k sont orthogonaux.

Pour une onde plane se propageant dans la direction positive de l’axe z (figure 1.1), une solution communément admise de l’équation de propagation en régime monochromatique de pulsation ω est donnée par :

$$E = E_0 e^{-\gamma z} e^{i\omega t} \quad (1.18)$$

La constante de propagation γ peut s’écrire :

$$\gamma = \alpha + i\beta \quad (1.19)$$

Ainsi, l’équation (1.18) devient :

$$E = E_0 e^{-(\alpha + i\beta)z} e^{i\omega t} = E_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (1.20)$$

La partie réelle α de la constante de propagation est appelée constante d’atténuation de l’onde EM dans le milieu et se définit comme :

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega}\right)^2} - 1 \right)} \quad (\text{Np/m}) \quad (1.21)$$

A partir de l’équation (1.21), on peut noter que plus la fréquence est élevée, plus l’atténuation sera importante dans le milieu.

La partie imaginaire β de la constante de propagation est appelée constante de phase de l’onde EM dans le milieu et se définit comme :

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega}\right)^2} + 1 \right)} \quad (\text{rad/m}) \quad (1.22)$$

Par ailleurs, la vitesse de propagation d’une onde EM v (m/s) dépend des propriétés du milieu dans lequel elle se propage : sa permittivité, perméabilité et conductivité. Son expression découle de l’équation (1.20) :

$$v = \frac{\omega}{\beta} \quad (1.23)$$

D'où en utilisant l'équation (1.22) :

$$v = c \left(\frac{\mu\epsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega} \right)^2} + 1 \right) \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1.24)$$

avec $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}$ la célérité d'une onde EM dans le vide ($c = 3.10^8 m.s^{-1}$).

Dans le cas des sols non magnétiques ($\mu_r = 1$) et à faibles pertes (*i.e.*, $\tan \delta \ll 1$), la vitesse de propagation se simplifie en :

$$v \simeq \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon'}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.25)$$

alors que le coefficient d'atténuation tend vers une valeur indépendante de la fréquence, qui dépend à la fois de la permittivité et de la conductivité :

$$\alpha \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon'}} \quad (1.26)$$

D'autre part, l'atténuation de l'onde d'un facteur $1/e$ est atteinte pour une profondeur dans le matériau qui est de l'ordre de l'inverse du coefficient d'atténuation, appelée « épaisseur de peau » :

$$d = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega} \right)^2} - 1 \right)}} \quad (1.27)$$

Enfin, l'impédance intrinsèque complexe du milieu se définit comme :

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\epsilon}} \quad (1.28)$$

Pour un milieu non magnétique à faibles pertes ($\tan \delta \ll 1$), cette relation se simplifie en :

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.29)$$

avec $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega$ = l'impédance de l'onde dans le vide.

Le tableau 1.1 donne les valeurs de permittivité relative, de conductivité électrique, de vitesse et d'atténuation pour les différents matériaux rencontrés dans les milieux naturels. Toutefois, ces valeurs peuvent avoir une large gamme de variations dans la bande de fréquence GPR, principalement en raison de la présence d'humidité. De plus, l'origine géographique de certains constituants (granite, gravier) influence les valeurs de permittivité dans une plage de fréquence donnée; il est donc difficile d'avoir des valeurs précises pour les paramètres diélectriques. Par conséquent, pour chaque site de mesure, les caractéristiques diélectriques du sous-sol doivent être estimées et comparées aux valeurs décrites dans la littérature.

TABLEAU 1.1 – Valeurs typiques des caractéristiques EM des matériaux à la fréquence de 100 MHz [Cassidy, 2009]. ϵ_r = permittivité relative, σ = conductivité électrique, v = vitesse de propagation et α = atténuation.

Matériau	ϵ_r	σ (mS/m)	v (m/ns)	α (dB/m)
Air	1	0	0.3	0
Eau douce	81	0.1-10	0.03	<1
Eau douce glacée	3-4	1	0.15-0.17	<1
Eau de mer	81	4000	0.03	>600
Eau de mer glacée	4-8	10-100	0.11-0.15	8-57
Béton - sec	4-10	1-10	0.09-0.15	<1-5
Béton - humide	10-20	10-100	0.07-0.09	5-36
Granite - sec	5-8	0.001-0.00001	0.11-0.13	<1-5
Granite - humide	5-15	1-10	0.08-0.13	<1-4
Sol sableux - sec	4-6	0.001-1	0.12-0.15	<1
Sol sableux - humide	10-30	0.1-10	0.05-0.09	<1-3
Sol argileux - sec	2-20	1-100	0.07-0.21	1-36
Sol argileux - humide	15-40	100-1000	0.05-0.08	42-252
Sol limoneux - sec	4-8	0.001-0.0000001	0.11-0.15	<1
Sol limoneux - humide	6-15	10-100	0.08-0.12	6-42

A travers l'ensemble des rappels introduits dans cette première sous-section, il sera plus aisé de comprendre les phénomènes associés à la propagation des ondes EM, notamment au sein d'un simulateur EM. Dans la sous-section qui suit, nous allons introduire l'une des méthodes les plus populaires pour simuler la propagation des ondes EM dans le domaine temporel.

1.2.2 La méthode FDTD

1.2.2.1 Présentation de la méthode

Dans le but de modéliser des scénarios GPR, il est nécessaire de disposer d'un outil capable de simuler numériquement la propagation des ondes EM et leur interaction avec les objets présents dans le domaine d'étude. Il existe plusieurs outils de simulation EM basés sur des approches différentes pour résoudre les équations de Maxwell.

Dans le cadre de cette thèse, le but n'était pas de mettre en place un code de l'une de ces méthodes, mais plutôt de l'utiliser afin de comprendre le comportement des ondes EM dans le contexte de notre recherche. Dans ce sens, nous avons fait le choix d'utiliser un logiciel de simulation EM *open-source* basé sur la méthode des différences finies (FDTD).

Les méthodes utilisées pour la résolution des équations de Maxwell sont nombreuses et se répartissent en deux catégories principales : solveurs d'équations différentielles et intégrales, qui peuvent être mises en œuvre dans le domaine temporel ou fréquentiel. Les solveurs différentiels incluent : la méthode FDTD, méthode des éléments finis (Finite Element Method (FEM)), la méthode des Volumes Finis dans le Domaine Temporel (Finite Volume Time-Domain (FVTD)) et la méthode du Galerkin Discontinue (Discontinuous Galerkin Method (DGM)). Les méthodes d'équation intégrale, principalement la méthode des moments (Method of Moments (MOM)), sont dérivées de solutions de la forme intégrale des équations de Maxwell. Toutes ces techniques présentent des compromis entre l'efficacité de calcul, la stabilité et la capacité à modéliser des géométries complexes. La méthode FDTD utilisée dans la modélisation numérique pour les travaux de cette thèse possède plusieurs avantages : sa simplicité, son efficacité et une stabilité conditionnelle inhérentes.

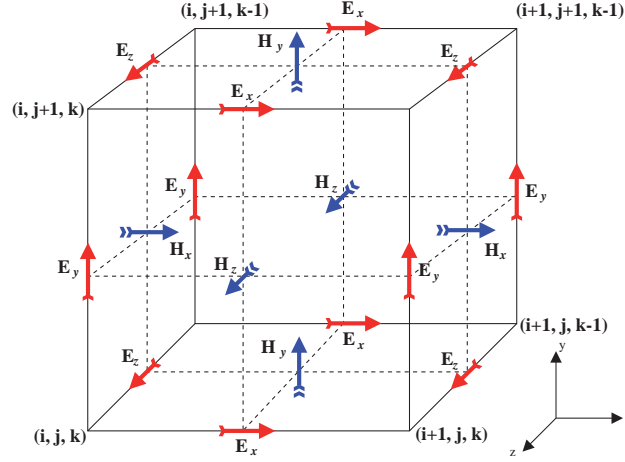


FIGURE 1.2 – Schéma d'une cellule de Yee en 3D.

La méthode **FDTD** est basée sur une discrétisation spatiale et temporelle des équations de Maxwell (1.15), généralement au sein d'une grille cartésienne rectiligne initialement proposée par Yee en 1966 [Yee, 1966]. Dans la formulation de base de la méthode **FDTD**, l'espace est divisé en parallélépipèdes rectangles identiques dits cellules de Yee (Figure 1.2) et à l'intérieur desquels les propriétés **EM** sont homogènes, et les composantes des champs électrique et magnétique sont calculées en un nombre fini de points. Bien évidemment, plus la discrétisation de l'espace (et du temps) est fine, plus le nombre de cellules est important et plus le temps de calcul est grand.

Les dérivées partielles par rapport au temps et aux variables d'espace sont approchées par une différence finie centrée du second ordre via un développement de Taylor comme exprimé dans les équations (1.30) et (1.31). La notation $u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = u_{i,j,k}^n$ est utilisée où Δx , Δy , et Δz désignent les pas spatiaux, Δt le pas temporel, et n un entier.

$$\frac{\partial u}{\partial x}(i, j, k, n) = \frac{u_{i+\frac{1}{2},j,k}^n - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta x} + O[(\Delta x)^2] \quad (1.30)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(i, j, k, n) = \frac{u_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j,k}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} + O[(\Delta t)^2] \quad (1.31)$$

Dans un milieu diélectrique continu, isotrope et linéaire, les deux équations de Maxwell (1.15c) et (1.15d) (avec $\vec{J}_s = \vec{0}$) se présentent sous le système d'équations scalaires (1.32) et qui représente la base du développement de la méthode **FDTD** :

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \quad (1.32a)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad (1.32b)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (1.32c)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - \sigma^* H_x \right) \quad (1.32d)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - \sigma^* H_y \right) \quad (1.32e)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - \sigma^* H_z \right) \quad (1.32f)$$

avec σ^* un terme de pertes magnétiques ($\Omega \cdot m^{-1}$)

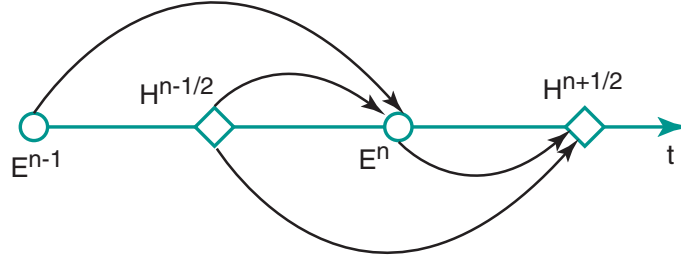


FIGURE 1.3 – Schéma saute-mouton (*leapfrog*) de mise à jour temporelle des champs électrique et magnétique.

Dans une cellule Yee, chaque composante du champ E est entourée de quatre composantes de champ H circulants et vice versa, comme le montre la figure 1.2. Cette disposition signifie que les composantes du champ E et du champ H sont décalées dans l'espace de la moitié d'une cellule et sont également échelonnées dans le temps suivant un schéma de type saute-mouton (*leapfrog*) comme l'illustre la figure 1.3. Une méthode pas à pas de saut de temps est utilisée pour mettre à jour les champs : d'abord les composantes du champ E sont mises à jour en utilisant des composantes de champ H précédemment calculées ; les composantes de champ H sont ensuite mises à jour en utilisant des composantes de champ E calculées précédemment ; puis le pas de temps est avancé et le processus répété.

Un exemple d'application de l'algorithme de Yee sur la composante du champ électrique E_x est donné par l'équation (1.33) :

$$\frac{E_x|_{i,j,k}^{n+1} - E_x|_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{1}{\epsilon_{i,j,k}} \left(\frac{H_z|_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z|_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} - \frac{H_y|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y|_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} - \sigma_{i,j,k} E_x|_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (1.33)$$

Le côté droit de (1.33) contient une valeur de champ E_x qui doit être évaluée au pas de temps $n + \frac{1}{2}$. Par contre nous n'avons pas accès à cette donnée puisque la seule valeur stockée de E_x est à n . Une approximation *semi-implicite* donnée par (1.34) [Taflöv and Hagness, 2005] est donc utilisée :

$$E_x|_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{E_x|_{i,j,k}^{n+1} - E_x|_{i,j,k}^n}{2} \quad (1.34)$$

En appliquant cette approximation, l'équation (1.33) devient :

$$E_x|_{i,j,k}^{n+1} = C_a E_x|_{i,j,k}^n + C_b \left(\frac{H_z|_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z|_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} - \frac{H_y|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y|_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} \right) \quad (1.35)$$

Avec :

$$C_a = \frac{1 - \frac{\Delta t \sigma_{i,j,k}}{2\epsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\Delta t \sigma_{i,j,k}}{2\epsilon_{i,j,k}}} \quad \text{et} \quad C_b = \frac{\frac{\Delta t}{\epsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\Delta t \sigma_{i,j,k}}{2\epsilon_{i,j,k}}} \quad (1.36)$$

La solution FDTD est ainsi obtenue en ré-appliquant la même procédure aux équations de E_y , E_z , H_x , H_y et H_z (1.32b - 1.32f).

1.2.2.2 Contraintes numériques de la méthode

La méthode **FDTD** est une technique numérique conditionnellement stable. Cela signifie qu'il existe une limite supérieure pour la valeur prise par le pas temporel Δt et toute valeur supérieure à celle-ci entraînera une instabilité de la solution numérique. Le critère de stabilité de la méthode applicable à tout type de milieux diélectriques rencontrés est donné par la condition **Courant–Friedrichs–Lewy (CFL)**. Cette condition affirme que le pas temporel Δt utilisé pour assurer la stabilité est limité par les pas spatiaux $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ comme suit :

$$\Delta t \leq \Delta t_{max} = \frac{1}{v \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}} \quad (1.37)$$

Puisque le critère de stabilité est établi pour un milieu homogène et sans perte, v est la vitesse de propagation des ondes **EM** dans ce milieu. Dans les situations pratiques où le modèle contient des régions avec des propriétés différentes et par conséquent des vitesses différentes, v considérée est donc la vitesse du milieu "le plus rapide". Puisque l'espace libre est toujours présent dans la modélisation **GPR** pour déterminer le pas de temps, v a la valeur de la vitesse de la lumière. Dans le cas où : $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta l$, le critère de stabilité devient :

$$\Delta t \leq \frac{\Delta l}{c\sqrt{3}} \quad (1.38)$$

La condition **CFL** est une limitation importante de la méthode **FDTD**. Une simulation contenant des caractéristiques géométriques fines (par rapport à λ) nécessitera une discrétisation spatiale fine afin d'être résolue de manière adéquate. Ceci entraînera un très petit pas temporel et, par conséquent, de longs temps de simulation.

La dispersion numérique est un autre aspect d'erreur dont peut souffrir la méthode **FDTD** [Giannopoulos, 1997]. En effet, lorsqu'une onde **EM** se propage dans un domaine de calcul maillé par les différences finies, elle subit un certain nombre de transformations (distorsion, atténuation, ...). L'ensemble de ces effets est principalement lié à la discrétisation choisie et aux approximations considérées dans le calcul des dérivées partielles de la solution. Généralement, pour éviter les problèmes liés à la dispersion numérique, il faut choisir un pas de discrétisation spatial au moins dix fois plus petit que la plus petite longueur d'onde des champs **EM** propagés :

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10} \quad (1.39)$$

1.3 Aperçu sur le logiciel de simulation gprMax

En ce qui concerne la partie simulation de cette thèse, nous avons fait le choix d'utiliser l'outil gprMax [Warren et al., 2016], un logiciel *open-source* qui simule la propagation des ondes **EM** en 2-D ou en 3-D en utilisant la méthode **FDTD** dont nous venons de décrire le principe de fonctionnement. Le logiciel a été conçu pour modéliser des scènes **GPR** mais peut également modéliser la propagation des ondes **EM** pour de nombreuses autres applications.

Le logiciel gprMax a été initialement développé en 1996 par A. Giannopolous (Edinburgh School of Engineering). En 2015, C. Warren (Northumbria University) a re-développé gprMax en remplaçant le code d'origine (en langage C) par une combinaison de langages de programmation Python et Cython. Par la suite, des améliorations supplémentaires ont été apportées à gprMax par I. Giannakis et N. Diamanti [www.gprmax.com].

La modélisation numérique par gprMax a été largement utilisée par la communauté **GPR** pendant la dernière décennie. Ceci est illustré dans la figure 1.4 par le nombre de publications ayant cité le simulateur entre 2005 et 2019.

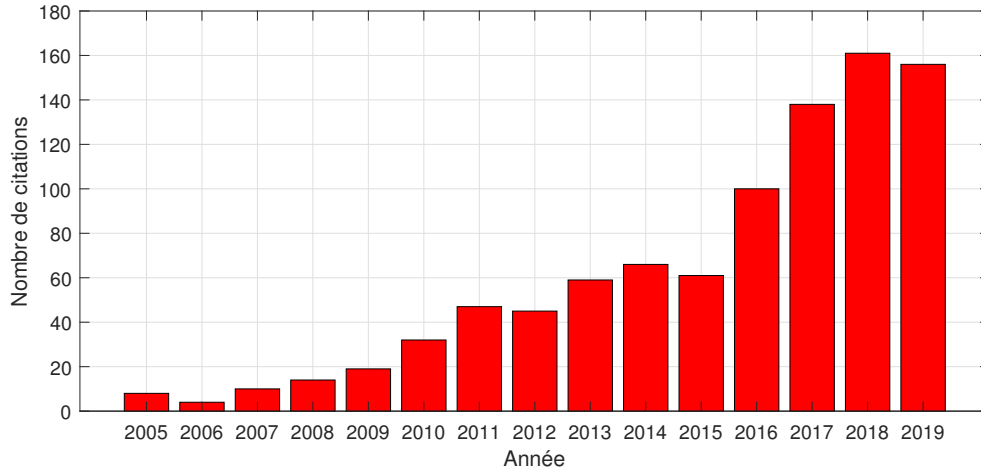


FIGURE 1.4 – Nombre de publications ayant cité gprMax entre 2005 et 2019. (source : www.gprmax.com)

La résolution numérique des équations de Maxwell sur gprMax repose donc sur le choix d'une discrétisation de l'espace Δx , Δy et Δz . Plus le pas choisi est faible, plus le modèle FDTD sera proche de la réalité. En conséquence, plus le pas est faible, plus le temps de calcul et la mémoire vive utilisés seront importants. Il est donc essentiel d'établir un compromis entre la précision et le temps de calcul afin de réaliser une simulation avec gprMax.

Concernant le pas de discrétisation temporel Δt , celui-ci est imposé automatiquement par gprMax de façon à respecter la condition CFL de stabilité numérique. En sortie, le logiciel fournit un fichier HDF5 (.OUT) qui est exploité par l'utilisateur sur MATLAB ou Python pour traiter les données de simulation GPR. Un deuxième type de fichier (.VTK) est fourni. Il est exploité sur Paraview pour visualiser la géométrie du modèle défini. Un exemple de visualisation 3-D sur Paraview est donné sur la figure 1.5.

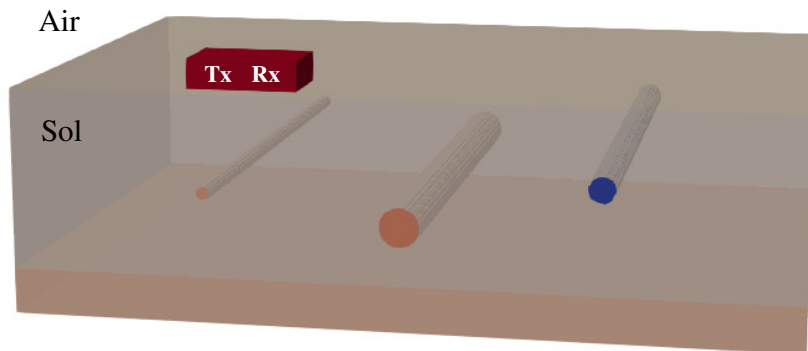


FIGURE 1.5 – Exemple d'un scénario GPR modélisé en 3-D sur gprMax (scène visualisée sur l'interface Paraview).

Le logiciel gprMax offre la possibilité de visualiser la propagation du champ (électrique ou magnétique) en fonction du temps au sein de la scène simulée à l'aide de Paraview. Pour illustration, la figure 1.6 présente des snapshots du module du champ électrique enregistrés à des intervalles de 0,7 ns pendant les premières 5,6 ns de la fenêtre temporelle d'un A-scan en mode 2-D.

Dans l'objectif de modéliser des scènes beaucoup plus réalistes, des fonctionnalités avancées ont été ajoutées au logiciel au fil des années. Cela concerne par exemple l'implémentation des milieux dispersifs utilisant des expressions multipolaires de Debye, Drude ou Lorenz, ou encore la définition des matériaux anisotropes pour une modélisation plus avancée.

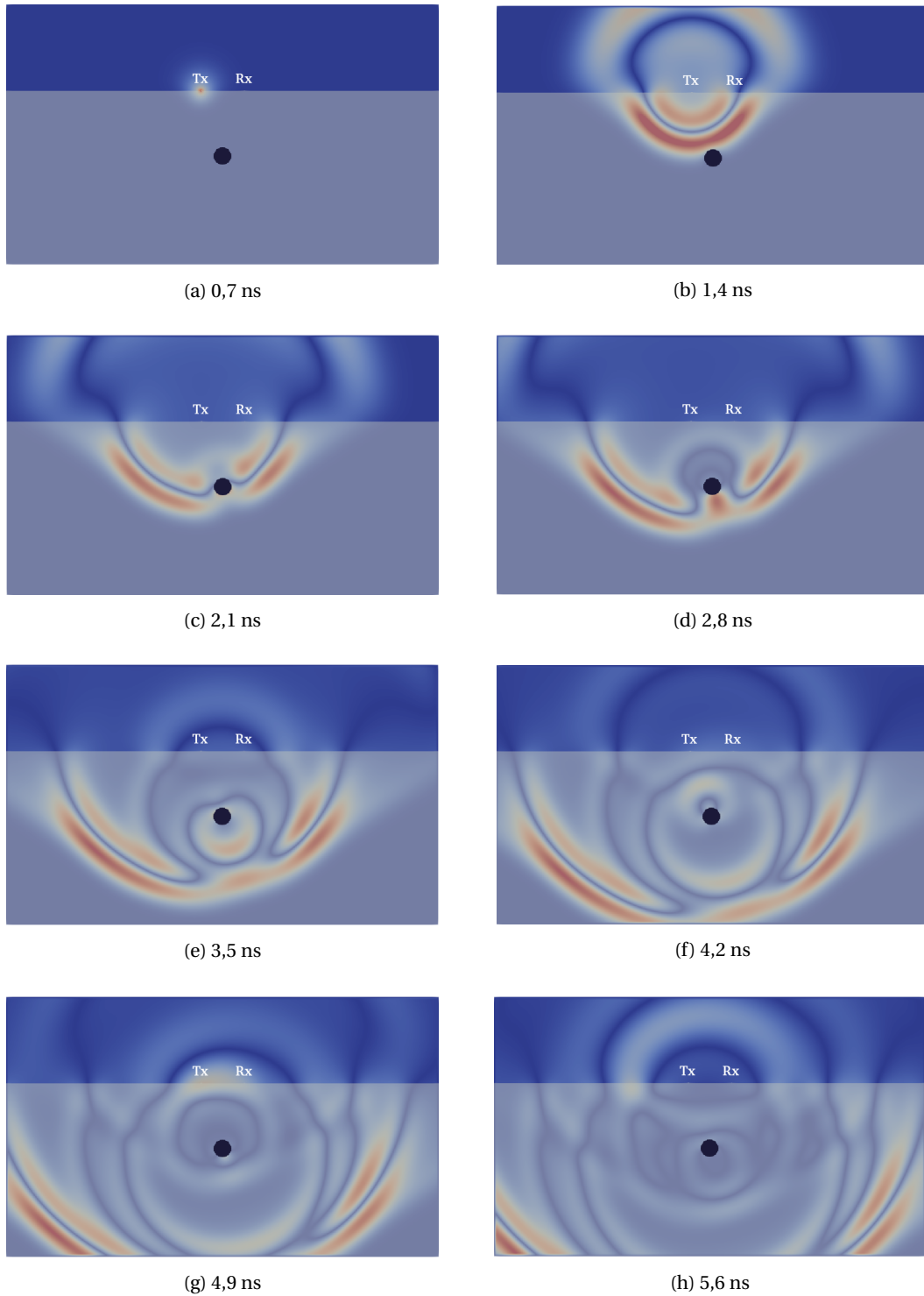


FIGURE 1.6 – Snapshots montrant la propagation du champ électrique avec un pas temporel de 0,7 ns lors d'un A-scan d'un cylindre diélectrique ($\epsilon_r = 24$ et $\sigma = 0.63 \text{ mS/m}$) enfoui dans un sol sableux sec ($\epsilon_r = 4$, $\sigma = 1 \text{ mS/m}$).

Une autre fonctionnalité va particulièrement nous intéresser dans le cadre de ce travail. Il s'agit de la modélisation des sols hétérogènes à l'aide de la formulation semi-empirique de Peplinski pour les propriétés diélectriques, et fractales pour les caractéristiques géométriques [Giannakis et al., 2016]. En effet, les propriétés environnementales du sol obéissent généralement aux lois des fractales. Ces dernières seront également utiles pour la génération des surfaces rugueuses qui peuvent ensuite être complétées par des couches d'eau ou d'herbe aléatoirement distribuées [Giannakis et al., 2016].

Par ailleurs, l'équipe gprMax a développé en 2018 l'un des premiers solveurs **FDTD open-source** accélérés par **Graphics Processing Unit (GPU)** [Warren et al., 2019]. Au sein du *framework* CUDA NVIDIA, un noyau (*Kernel*) optimal a été conçu pour l'exécution sur **GPU**. Le solveur ainsi développé est beaucoup plus rapide que celui parallélisé CPU (OpenMP) déjà implémenté sur gprMax (jusqu'à 30 fois plus rapide).

1.4 Principe du GPR

1.4.1 Histoire et applications

Le terme RADAR est un acronyme de *RA*dio *DE*tectio*N* *AN*d *RA*nging. La première utilisation du radar pour déterminer la structure des éléments enfouis est apparue en 1926 dans les travaux de Hülsebeck. Il a noté que toute variation diélectrique produirait des réflexions et que la technique avait des avantages par rapport aux méthodes sismiques. Ensuite, la technologie semble avoir perdu tout intérêt jusqu'aux années 50.

Au début des années 1950, le développement de l'utilisation des impulsions **EM** a repris dans le but de sonder les sous-sols tels que la glace à de grandes profondeurs [Stenson, 1951]. Quelques années plus tard, El-Said [1956] a tenté d'utiliser les signaux réfléchis par la nappe phréatique dans le but de déterminer sa profondeur.

Pendant les années 1960, la majorité de l'activité impliquait des échos radio dans la glace. Des groupes tels que le *Scott Polar Research Institute* de Cambridge [Bailey et al., 1964], et le *Geophysical and Polar Research Center* de l'Université du Wisconsin [Bentley, 1964], étaient actifs dans les régions polaires ainsi que sur les glaciers.

Au début des années 1970, de nombreuses applications commerciales utilisant un **GPR** ont été mentionnées dans la littérature; Morey [1974] à titre d'exemple. A cette époque, les applications visaient principalement le domaine du génie civil : localisation de cavités, tunnels et roches, détection de câbles et de tubes, etc. Les systèmes utilisés à cette époque étaient exclusivement des systèmes impulsionnels.

A partir des années 1980, la gamme d'applications n'a cessé de croître. Aujourd'hui, le **GPR** est également utilisé en archéologie [Goodman et al., 1995], pour l'estimation de la profondeur d'eau des rivières ou des lacs [Dabas et al., 1999], la détection de cavités et de mines [Clementi et al., 2014; Daniels, 2006], et pour la surveillance de l'infiltration d'eau [Saintenoy et al., 2008]. D'autres applications plus récentes ont concerné l'évaluation des structures en béton [Dérobert et al., 2017], la détection des jonctions des câbles électriques souterrains [Liu et al., 2018], la détection des tuyaux de gaz [Terrasse et al., 2016], l'étude des interactions sol-racines [Guo et al., 2013], ou encore la cartographie de l'humidité du sol par drone [Wu et al., 2019]. Cette liste est non-exhaustive, mais regroupe les principales applications.

On associe généralement une gamme de fréquences à chacune de ces applications qui doit être adaptée à la taille des objets que l'on cherche à caractériser et à la résolution nécessaire. La figure 1.7 résume les gammes de fréquences associées classiquement à ces applications et donne une idée de la taille approximative des antennes associées.

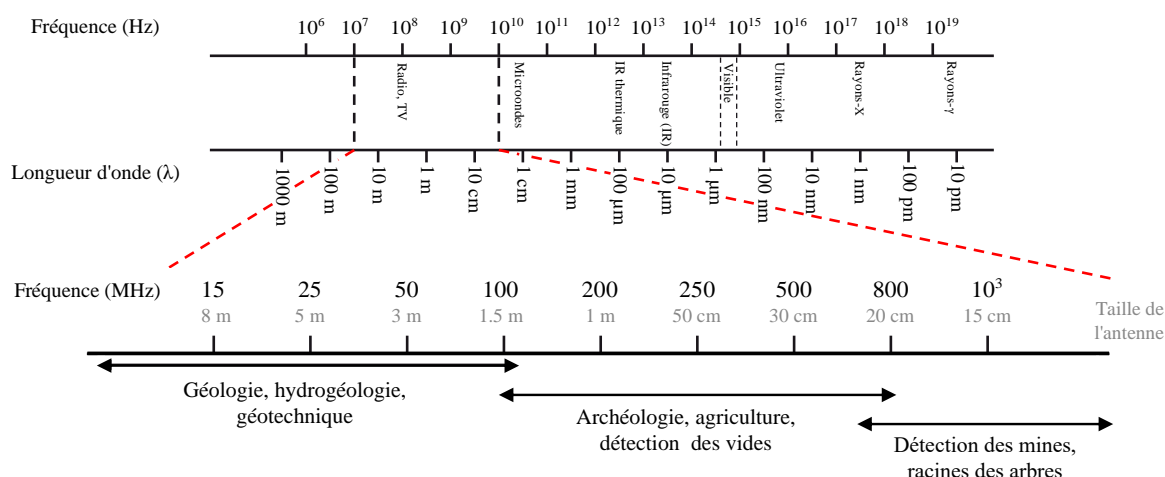







FIGURE 1.7 – Positionnement des différentes applications GPR dans le spectre EM.

1.4.2 Marché du GPR

Le marché du **GPR** devrait passer de 493 millions de dollars en 2019 à 726 millions de dollars à l'horizon de 2024 avec un taux de croissance annuel composé (TCAC) de 8,1% de 2019 à 2024 ¹. Les principaux facteurs responsables de cette croissance du marché sont les suivants :

- une demande qui ne cesse d'augmenter à cause des préoccupations relatives à la sécurité et à la protection des services publics souterrains,
- les avantages du **GPR** par rapport aux autres technologies traditionnelles,
- la demande croissante des secteurs de l'eau, du pétrole et du gaz, et l'augmentation du nombre de projets de construction de ponts, de routes, de voies ferrées, de voies maritimes et de barrages,

TABEAU 1.2 – Liste des principales sociétés du monde entier qui fabriquent des systèmes GPR pour une large gamme d'applications de géophysique et d'ingénierie.

Société	Localisation	Site web	Logo
IDS GeoRadar	Pisa, Italie (1980)	https://idsgeoradar.com/	
Sensors & Software Inc. (SSI)	Ontario, Canada (1988)	https://www.sensoft.ca/	
Geophysical Survey Systems, Inc., (GSSI)	Nashua, USA (1970)	https://www.geophysical.com/	
MALÅ	Sundbyberg, Suède (1923)	https://www.malagpr.com.au/	
3D Radar	Trondheim, Norvège (2001)	https://3d-radar.com/	

1. <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/ground-penetrating-radar.asp>

- les réglementations et les normes imposées par les gouvernements pour l'utilisation d'un dispositif de détection approprié avant de commencer à creuser, à démolir ou à construire toute infrastructure,
- le soutien gouvernemental à la mise en œuvre des systèmes de prospection par GPR (aux États-Unis par exemple, environ 10 milliards de dollars par an sont consacrés à la localisation d'infrastructures souterraines).

1.4.3 Bilan de liaison

L'équation du radar (1.40) est un bilan de puissances sur le trajet d'une onde émise par un radar [Skolnik, 1990]. Cette équation traduit l'influence de phénomènes physiques sur la performance du radar. Elle exprime la puissance reçue par le radar en fonction des caractéristiques du système (antenne, fréquence, pertes de signal, ...), de celles de la cible et du milieu traversé le long du trajet.

$$P_r = \frac{P_e G_r G_e \sigma_t^2 \lambda^2 L_s}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1.40)$$

où P_r est la puissance reçue par le radar (en W) qui doit être supérieure au niveau minimal du signal détectable par le système, P_e la puissance émise (en W), G_e G_r les gains maximums des antennes émettrice et réceptrice respectivement, σ_t la Surface Equivalente Radar (SER) (en m^2) qui décrit la capacité de rétrodiffusion d'un signal radar par la cible, λ la longueur de l'onde EM (en m), L_s un facteur représentant la moyenne des pertes du système et R la distance entre le système et l'objet (en m).

Dans les systèmes radars réels, le bruit est toujours présent. On définit ainsi le rapport signal à bruit (Signal-to-Noise Ratio (SNR)) comme le rapport entre la puissance reçue (P_r) et celle du bruit (P_n) :

$$\text{SNR} = \frac{P_r}{P_n} \quad (1.41)$$

En prenant en compte le SNR, la distance maximale atteignable par un système radar peut s'exprimer à partir de (1.40) par :

$$R_{max} = \left[\frac{P_e G_r G_e \sigma_t^2 \lambda^2 L_s}{(4\pi)^3 (\text{SNR}) P_n} \right]^{1/4} \quad (1.42)$$

La plupart des paramètres de cette équation peuvent être contrôlés par le concepteur du radar, qui pourra définir les valeurs appropriées aux paramètres pour s'adapter à une application particulière. Si l'on veut analyser l'équation (1.42) d'un point de vue qualitatif, on pourra dire que pour atteindre une profondeur de sondage optimale importante, il est nécessaire que les antennes du radar soient bien adaptées, à faibles pertes ohmiques et fonctionnent en basses fréquences.

Le système GPR obéit aux principes décrits dans cette sous-section. Nous verrons dans la sous-section suivante comme l'équation radar peut être adaptée au cas particulier du GPR.

1.4.4 Principe de fonctionnement du GPR

Le GPR est une technique de mesure géophysique non destructive dont le principe est donc basé sur l'analyse de la propagation, la réflexion et la diffusion des ondes EM dans un milieu contenant des discontinuités diélectriques. La plage de fréquences du GPR peut varier de 1 MHz (en dessous de 1 MHz, les champs EM peuvent être décrits par l'équation de diffusion et n'agissent pas comme des ondes) à 10 GHz (qui est proche de la fréquence de relaxation de l'eau, cela crée des pertes extrêmes qui rendent le GPR peu fiable). En pratique, les systèmes GPR qui existent dans le marché opèrent sur une gamme de fréquences allant de 10 MHz jusqu'à 5 GHz.

Les différentes composantes d'un système GPR sont montrées sur la figure 1.8. L'antenne Tx émet une onde EM dans le sol et l'antenne Rx reçoit la réponse. S'il y a un changement des propriétés diélectriques dans le sol, une partie de l'onde EM est réfléchi vers le récepteur. Le système

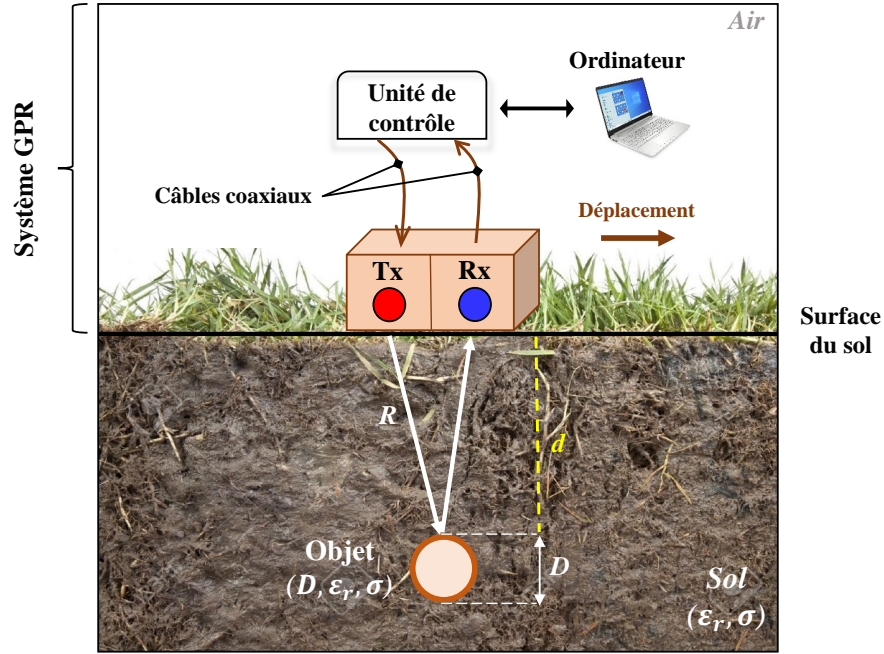


FIGURE 1.8 – Schéma des différents composants d'un système GPR.

balaye le sol pour collecter les données à divers endroits. Ensuite, un profil **GPR** est construit en traçant l'amplitude des signaux reçus en fonction du temps et de la position, représentant une tranche verticale du sous-sol, comme indiqué sur la figure 1.9. L'axe du temps peut être converti en profondeur en supposant une vitesse pour l'onde **EM** dans le sous-sol. Le principe de fonctionnement est donc simple, mais comme le sous-sol est généralement constitué de plusieurs composants de tailles différentes et répartis de façon aléatoire, l'image obtenue ne peut pas être interprétée directement par un utilisateur inexpérimenté.

L'équation (1.40) peut être utilisée pour décrire le mécanisme de détection par **GPR**. Néanmoins, le concept du **GPR** diffère considérablement des radars conventionnels, principalement en raison de la courte portée des cibles et des milieux de propagation avec des pertes d'énergie plus importantes. Il est donc nécessaire de prendre en compte l'effet de l'atténuation des ondes **EM** dans le sous-sol prospecté. Ainsi, dans le cas du **GPR**, l'équation du radar devient :

$$P_r = \frac{P_e G_r G_e \sigma_t^2 \lambda^2 L_s e^{-\alpha 4R}}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1.43)$$

où α est la constante d'atténuation définie précédemment en (1.21).

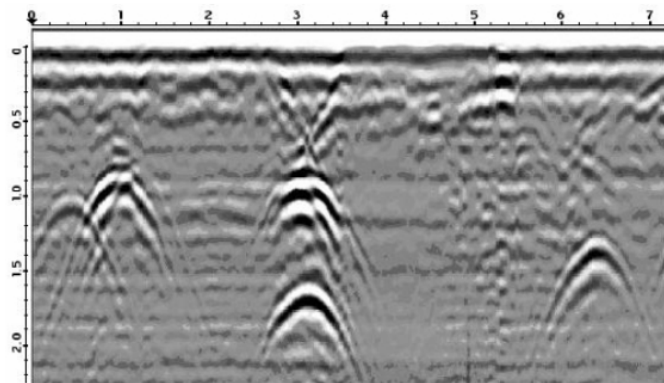


FIGURE 1.9 – Exemple d'un scan GPR avec une représentation en niveaux de gris.

1.4.5 Les différents types de GPR

Deux principales technologies sont associées aux systèmes GPR : le radar à impulsions courtes (domaine temporel), et le radar à ondes continues à fréquences échelonnées (Stepped-Frequency Continuous Wave (SFCW)) (domaine fréquentiel). Les radars commerciaux sont principalement impulsionnels et fournissent des données dans le domaine temporel. Nous présentons rapidement le principe de fonctionnement des deux technologies GPR.

Radar impulsionnel

La solution impulsionnelle a été mise en place pour la première fois au milieu des années 70 et permet une visualisation en temps réel des données dans le domaine temporel. La plupart des systèmes GPR commerciaux appartiennent à cette famille car la technologie requise est plus simple et les composants électroniques sont moins chers. Les radars impulsionnels sont basés sur l'émission d'une impulsion EM de très courte durée (de l'ordre de quelques nanosecondes) et de haute énergie transmise au sol par le biais d'une antenne. Pour pouvoir transmettre une impulsion, la plus courte possible, et obtenir une bonne résolution en profondeur, l'antenne doit avoir une réponse impulsionnelle la plus courte possible, c'est-à-dire la bande passante la plus large possible (idéalement au moins une décade, comme par exemple [100 MHz - 1 GHz]).

Le schéma électronique d'un GPR impulsionnel est montré sur la figure 1.10. Les transistors à avalanche sont généralement utilisés pour générer des impulsions très courtes et de plusieurs watts de puissance moyenne. L'acquisition des données étant échantillonnée impose un échantillonnage à quelques GHz.

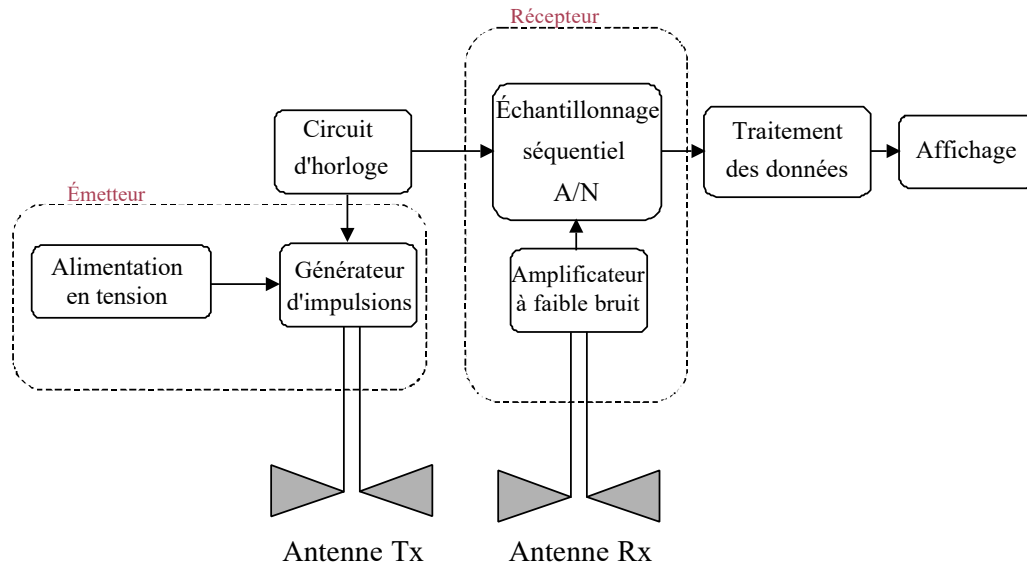


FIGURE 1.10 – Schéma électronique d'un GPR impulsionnel.

Le signal d'excitation le plus communément utilisé dans le GPR impulsionnel est le monopulse gaussien qui n'est autre que la première dérivée de la fonction gaussienne. Dans cette thèse, ce signal a été utilisé comme impulsion d'excitation de l'antenne d'émission dans les simulations FDTD (et également dans le traitement des données des mesures fréquentielles). L'expression du monocycle gaussien est donnée par :

$$s(t) = -2\sqrt{\frac{e}{2\xi}}\xi(t-\tau)\exp(-\xi(t-\tau)^2) \quad (1.44)$$

où $\tau = 1/f_c$, $\xi = 2\pi^2 f_c^2$, avec f_c la fréquence centrale du signal d'excitation.

Pour illustration, deux monocycles gaussiens associés à deux fréquences centrales f_c (1 GHz et 1,8 GHz) sont tracés sur la figure 1.11 dans le domaine temporel et fréquentiel. L'impulsion du monocycle gaussien montre deux oscillations d'amplitudes opposées et son inversion de signe peut être facilement observée dans les radargrammes GPR.

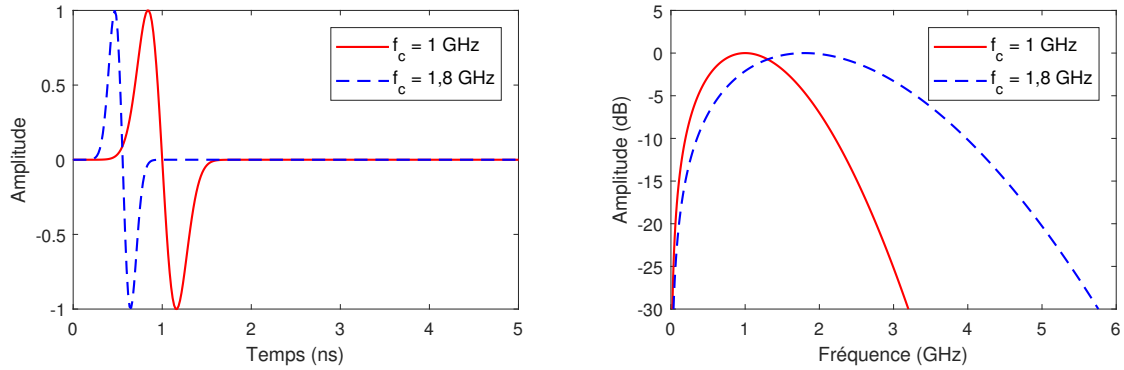


FIGURE 1.11 – Représentation du signal d'excitation GPR du type première dérivée de la gaussienne dans les domaines temporel (à gauche) et fréquentiel (à droite).

Radar à saut de fréquences (SFCW)

Les radars SFCW sont conçus pour fournir des données complexes dans le domaine des fréquences. Cette technologie se base sur la transmission d'une série de fréquences discrètes qui sont ensuite transformées en domaine temporel par le biais d'une Transformée de Fourier Inverse (TFI). Comme illustré par le schéma de la figure 1.12, le radar SFCW a besoin d'un synthétiseur de fréquence avec une grande stabilité pour parcourir une bande (B) de fréquences également espacées d'un intervalle Δf . Ainsi, pour une fréquence f donnée, on émet le signal continu de fréquence f et on enregistre la valeur d'amplitude et de phase du signal réfléchi par le sol. On passe ensuite à la fréquence suivante en émettant le signal continu de fréquence $f + \Delta f$ et on enregistre

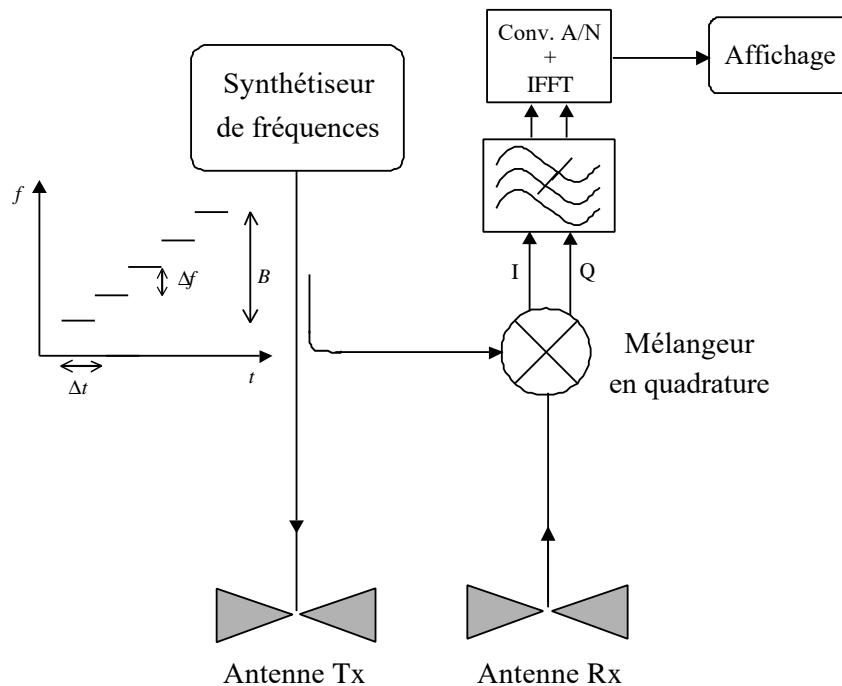


FIGURE 1.12 – Schéma électronique d'un GPR à saut de fréquences (SFCW).

le signal réfléchi correspondant. On procède ainsi jusqu'à balayer toute la gamme de fréquences. Pour chaque fréquence f , l'amplitude et la phase du signal reçu sont comparées au signal émis. En effet, à chaque itération, un signal de retour est formé en mélangeant le signal reçu avec une partie du signal émis. Les signaux en bande de base I (en phase) et Q (en quadrature) sont ensuite échantillonnés par un [Convertisseur Analogique Numérique \(CAN\)](#) de haute précision puis stockés. Enfin, une [TFI](#) est effectuée pour transformer les données du domaine fréquentiel au domaine temporel. Plus de détails sur la technologie [SFCW](#) peuvent être trouvés dans [Noon \[1996\]](#).

Le radar [SFCW](#) présente quelques avantages par rapport au radar impulsionnel. Sa plage dynamique² peut être conçue pour être plus importante. En outre, pour deux systèmes couvrant la même bande passante, le (SNR) sera plus élevé pour le système [SFCW](#), car le bruit produit dans un radar [SFCW](#) est plus bas par rapport à celui produit dans un radar impulsionnel. L'inconvénient d'un [GPR SFCW](#) est le temps d'acquisition puisque la mesure est réalisée pour chaque fréquence du balayage. Les systèmes impulsionnels récents effectuent souvent la moyenne de plusieurs A-scans pour améliorer leur plage dynamique (technologie [HDR](#), plus de détails concernant cette technologie seront fournis dans le chapitre 5 de ce manuscrit).

Dans ce travail de thèse, nous avons combiné les deux solutions. Les simulations numériques ont été réalisées dans le domaine temporel (méthode [FDTD](#)) et les mesures au laboratoire ont été conduites dans le domaine fréquentiel (technique [SFCW](#)). Finalement, un système [GPR MALÅ HDR](#) (mesures en temporel) a été exploité pour conduire des mesures réelles sur le terrain.

1.4.6 Collection de données

Quel que soit le type de la technologie [GPR](#) employé, les données collectées peuvent être présentées sous différentes formes. L'objectif de la présentation des données [GPR](#) est de fournir un affichage visuel des données traitées qui soit le plus proche possible de l'image du sous-sol, avec les anomalies associées aux objets d'intérêt situées dans leurs positions spatiales appropriées. Ainsi, produire une bonne représentation de données fait partie intégrante de l'interprétation de l'information. Nous expliquons ici trois types de représentations de données utilisées dans le contexte du [GPR](#) pour une meilleure compréhension de la terminologie.

A-scan

Un A-scan (appelé aussi une trace) est une représentation unidimensionnelle de l'amplitude du signal collecté en fonction du temps après avoir placé l'antenne au-dessus de la position d'intérêt. Un exemple de A-scan est montré sur la figure 1.13. La première réflexion correspond généralement à un mélange entre le couplage direct entre les antennes (Tx, Rx) et la réflexion sur la surface du sol. La seconde réflexion (à $t = 5$ ns), d'amplitude plus faible, correspond à l'anomalie ou l'objet d'intérêt.

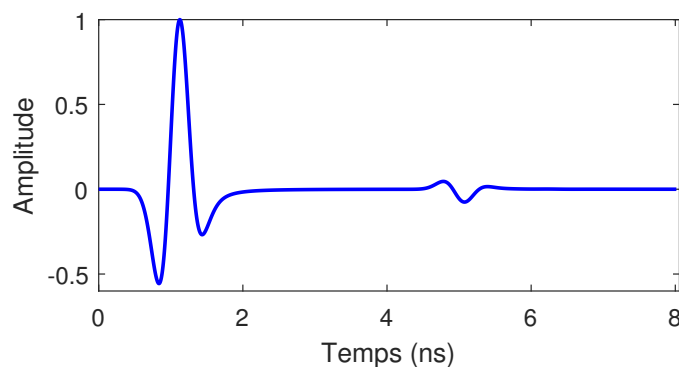


FIGURE 1.13 – Exemple d'un A-scan.

2. La plage dynamique désigne le rapport entre les valeurs maximale et minimale du signal détecté par le récepteur, exprimé généralement en décibels.

B-scan

La plupart des analyses de données GPR sont basées sur l'interprétation d'une série de signaux présentés sous forme de B-scan. Il s'agit d'un ensemble de données constitué à partir d'une série de A-scans mesurés le long de l'axe x avec un pas de déplacement uniforme de Δx (un B-scan est aussi appelé "un radargramme" ou "un profil"). Un exemple de B-scan issu de la simulation numérique est illustré par la figure 1.14.

L'image 2-D résultante peut être vue comme une section verticale du sous-sol où l'axe horizontal représente la position sur la surface du sol et l'axe vertical est le temps aller-retour de propagation de l'onde EM. Une matrice est construite où chaque ligne représente un échantillon temporel et chaque colonne une trace. La valeur d'un élément de la matrice est l'amplitude du champ pour la trace et l'échantillon temporel associés.

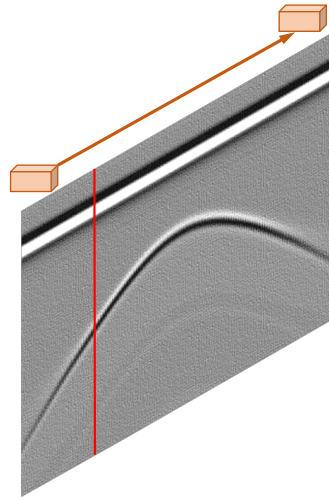


FIGURE 1.14 – Exemple d'un B-scan. La ligne rouge représente la trace (A-scan) montrée sur la figure 1.13.

C-scan

Finalement, en collectant l'ensemble des B-scans, ou en d'autres termes, en déplaçant le système antenneur sur une grille du plan $x - y$, une représentation en 3-D dite C-scan est obtenue. Un exemple est donné par la figure 1.15. De nos jours, de nombreux logiciels de post-traitement GPR ont intégré des fonctionnalités pour tracer directement les C-scans des données enregistrées.

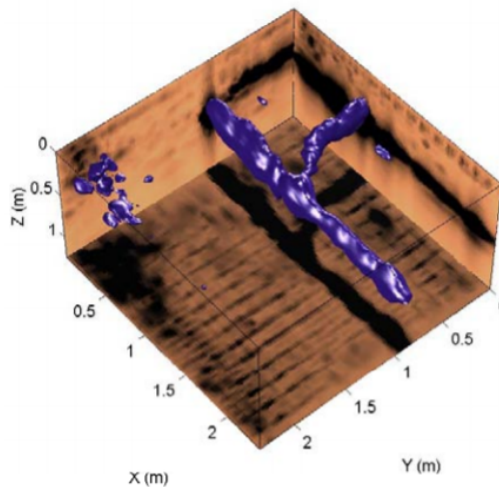


FIGURE 1.15 – Exemple d'un C-scan (issu de Oristaglio et al. [2001]) représentant une image 3-D du sous-sol.

1.4.7 Résolution d'un système GPR

La résolution est un paramètre fondamental dans tous les systèmes de détection basés sur la propagation des ondes EM. Elle détermine la précision avec laquelle les cibles peuvent être localisées et la quantité des détails géométriques qui peut être extraite (comme la taille, la forme ou l'épaisseur). Pour un système GPR, on distingue entre une résolution verticale (*range resolution*), et une résolution horizontale (*lateral resolution*). La figure 1.16 illustre le cas de deux cibles séparées horizontalement d'une distance de Δl , et les mêmes cibles séparées verticalement de Δr .

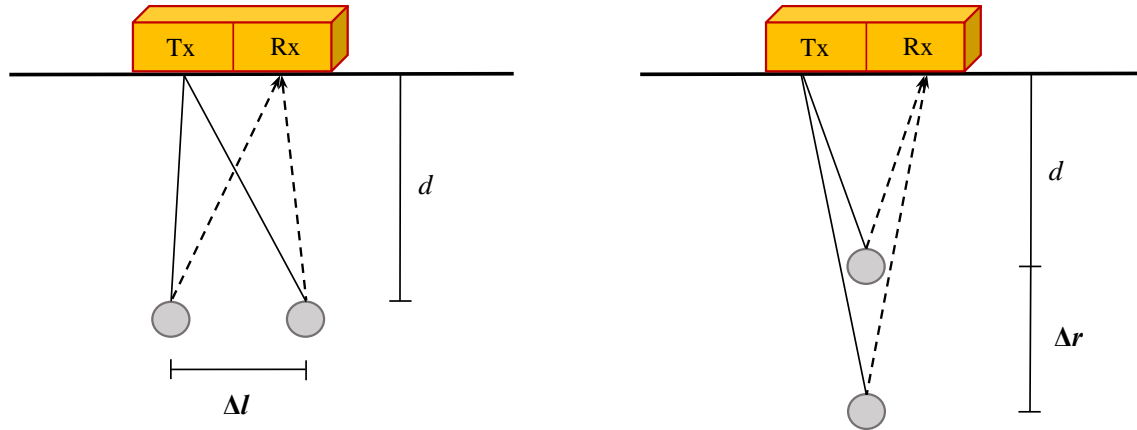


FIGURE 1.16 – Résolution horizontale et verticale d'un système GPR.

Comme le montre la figure 1.17, une impulsion est caractérisée par sa largeur à mi-amplitude W qui est directement liée à la bande fréquentielle B par :

$$W = \frac{1}{B} \quad (1.45)$$

Pour pouvoir distinguer séparément deux cibles identiques, il est communément accepté que les impulsions réfléchies issues des deux cibles doivent être séparées d'au moins $\frac{W}{2}$.

Pour la résolution verticale, l'équation (1.46) donne la différence entre les temps d'arrivée des signaux provenant de la première et la deuxième cible.

$$\Delta t = \frac{2(d + \Delta r)}{v} - \frac{2d}{v} = \frac{2\Delta r}{v} \quad (1.46)$$

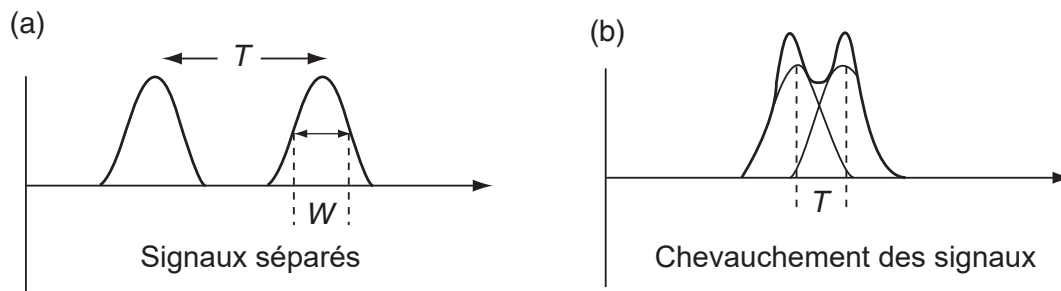


FIGURE 1.17 – Signaux temporels de largeur W . (a) Les signaux sont clairement séparés lorsque $T \gg W$, (b) Signaux difficiles à distinguer lorsque $T \ll W$.

Ainsi, la séparation verticale minimale pour pouvoir distinguer les deux cibles est donnée par (1.47).

$$\Delta t \geq \frac{W}{2} \Rightarrow \Delta r \geq \frac{vW}{4} \quad (1.47)$$

Par conséquent, la résolution verticale est une fonction de la largeur de l'impulsion transmise (et donc de sa fréquence), et de la vitesse dans le sol.

Pour la résolution horizontale, la différence temporelle entre les temps de propagation pour la première et la deuxième cible est donnée par :

$$\Delta t = \frac{2\sqrt{d^2 + \Delta l^2}}{v} - \frac{2d}{v} \quad (1.48)$$

En pratique, la distance Δl peut-être négligée par rapport à d . Ce qui mène à l'équation :

$$\Delta t \approx \frac{\Delta l^2}{vd} \quad (1.49)$$

Par conséquent, la résolution horizontale est donnée par :

$$\Delta l \geq \sqrt{\frac{vdW}{2}} \quad (1.50)$$

La résolution horizontale est donc une fonction de la largeur de l'impulsion, la vitesse et la distance antennes-cibles. Néanmoins, lors des mesures réelles, la résolution (verticale et horizontale) d'un système GPR est également affectée par l'atténuation du signal et l'hétérogénéité du sol prospecté.

1.4.8 Configurations GPR

Il existe différentes configurations qui peuvent être adoptées lors de la réalisation de mesures GPR selon le mode d'opération et l'orientation des antennes utilisées. Chaque configuration nécessite ses propres techniques de post-traitement et peut être exploitée pour améliorer les réponses de certaines cibles selon les situations.

En revanche, le choix de l'espacement entre les A-scans est étroitement lié à la fréquence centrale (f_c) du signal émis et aux propriétés diélectriques du sol impliqué. Pour s'assurer que la réponse du sol n'est pas spatialement repliée, l'intervalle d'échantillonnage de Nyquist doit être respecté. Le pas d'échantillonnage de Nyquist est équivalent à un quart de la longueur d'onde dans le milieu sondé. Il est donné par l'équation suivante :

$$nx = \frac{c}{4f_c\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.51)$$

Offset commun Tx-Rx

C'est le mode le plus fréquemment utilisé pour caractériser le sous-sol par GPR. La quasi-totalité des systèmes GPR commerciaux est conçue pour fonctionner en mode offset commun. Ils sont généralement équipés d'antennes émettrice et réceptrice logées dans le même boîtier blindé (séparation et orientation fixes). La figure 1.18a illustre ce mode d'opération où les mesures sont effectuées à intervalles réguliers en respectant le critère de Nyquist. Des données à espacement uniforme sont normalement souhaitées si des techniques avancées de traitement et de visualisation des données doivent être appliquées par la suite.

Point Médian Commun

Dans ce mode d'opération, la distance entre l'émetteur et le récepteur est augmentée sur la ligne de mesure de sorte que le centre entre les deux antennes reste invariable. Le mode d'opération Point Médian Commun (PMC) est principalement utilisé pour obtenir une estimation de

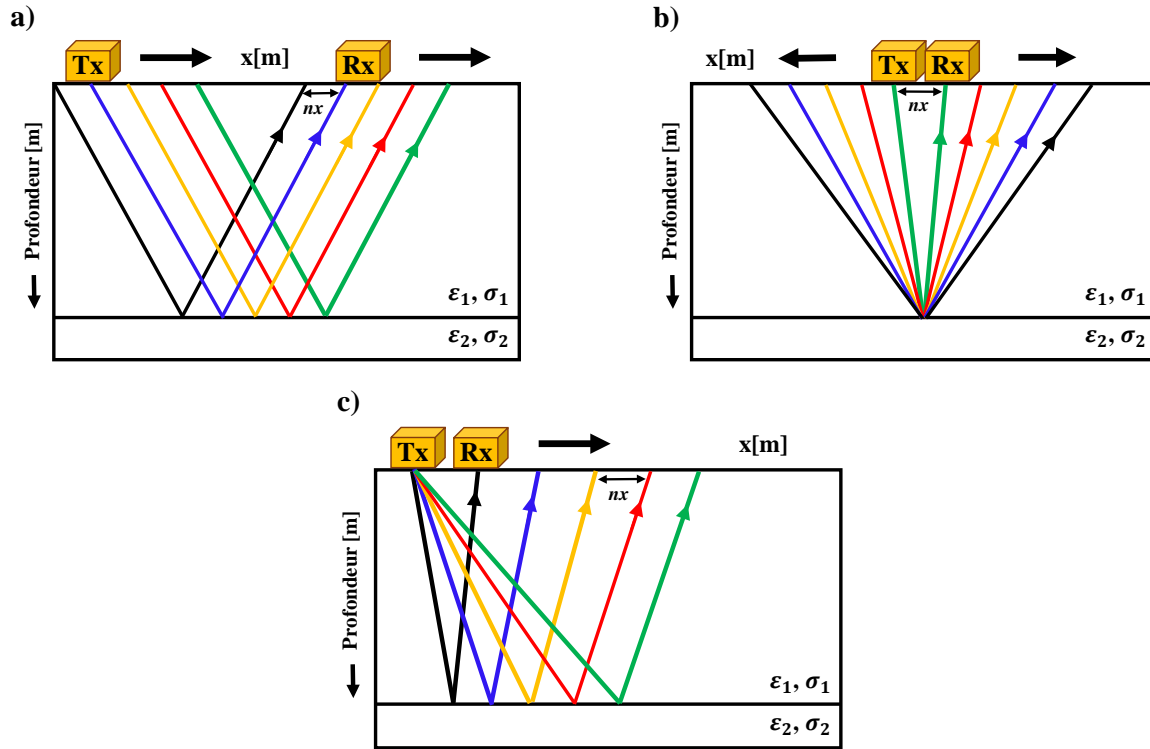


FIGURE 1.18 – Les trois principales modes d'opération d'un système GPR. (a) Offset commun Tx-Rx, (b) Point Médian Commun (CMP), (c) Source Commune, nx est l'intervalle de Nyquist défini dans (1.51).

la vitesse du signal radar en fonction de la profondeur dans le sol en faisant varier l'espacement des antennes et en mesurant la variation du temps de trajet dans les deux sens comme illustré sur la figure 1.18b. Plus de détails seront présentés dans le chapitre 4 concernant l'estimation de la vitesse par la méthode du PMC.

Source Commune

Dans le mode de Source Commune (appelée aussi Réflexion-Réfraction à grand angle), l'antenne d'émission est maintenue à un emplacement fixe tandis que l'antenne de réception est éloignée de l'émetteur avec un pas d'incrément spatial constant (figure 1.18c). En comparaison avec le mode d'offset commun, ce mode présente les avantages d'un meilleur rapport signal à bruit, une profondeur de pénétration plus importante et un positionnement plus précis dans l'espace.

D'autre part, les antennes émettrices et réceptrices peuvent également être utilisées sous différentes orientations comme le montre la figure 1.19. La modification de l'orientation des antennes peut améliorer considérablement les réponses de certains types de cibles étant donné que les diagrammes de rayonnement des antennes GPR ne sont pas omnidirectionnels. Les orientations de



FIGURE 1.19 – Les différentes orientations des antennes GPR.

type *broadside* et *end-fire* ont tendance à être utilisées pour détecter des cibles orientées parallèlement ou perpendiculairement à l'axe de l'antenne comme les tuyaux et les canalisations. La polarisation croisée, quant à elle, est généralement utilisée pour détecter des objets orientés de façon aléatoire [Cassidy, 2009].

Il s'avère donc primordial de s'intéresser à la partie antennaire dans le sujet du GPR. Dans la sous-section suivante, nous allons rappeler les principales caractéristiques d'une antenne, avant de donner une vue générale sur les antennes classiquement utilisées dans le contexte du GPR.

1.4.9 Antennes GPR

Lors d'une mesure GPR, l'antenne établit la liaison entre le système et le milieu étudié. Par conséquent, elle demeure un élément important du système GPR et fait l'objet d'études approfondies. Dans cette section, nous fournissons un résumé -issu essentiellement de Balanis [2016]- des principaux paramètres qui permettent de définir et quantifier les performances et le comportement d'une antenne.

De plus, il existe une variété d'antennes présentant des avantages mais aussi des inconvénients que le concepteur du système GPR saura apprécier en fonction de ses usages. Cependant, la quasi-totalité des antennes intégrées dans les radars GPR sont des antennes large bande conçues autour d'une fréquence d'opération. Dans la deuxième partie de cette section, nous présentons les principaux types d'antennes utilisées dans les applications GPR.

1.4.9.1 Principales caractéristiques d'antenne

Régions du champ EM

Les propriétés du champ EM rayonné par un système antennaire évoluent en fonction d'un certain nombre de facteurs comme la distance [Balanis, 2016]. Ainsi, l'espace entourant une antenne est divisé en trois régions de rayonnement distinctes. Une illustration de ces trois zones pour une antenne (du type dipolaire) est fournie dans la figure 1.20, où D est la plus grande dimension de l'antenne.

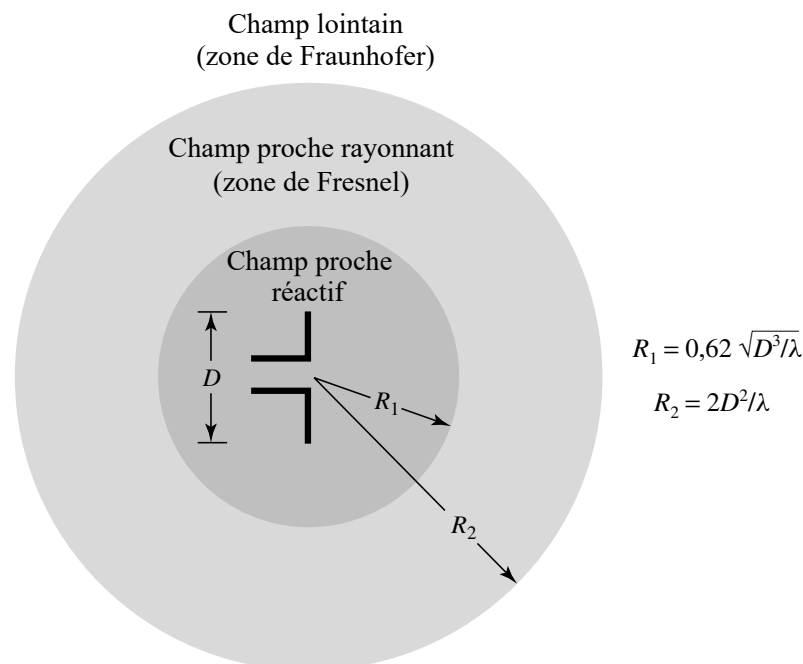


FIGURE 1.20 – Définition des trois zones du champ EM rayonné par une antenne.

La zone de champ proche réactif est définie comme l'environnement entourant immédiatement l'antenne et dans lequel les ondes évanescentes sont prédominantes. La limite de cette zone est souvent comprise dans un rayon de $0,62\sqrt{D^3/\lambda}$ autour de l'antenne. La zone de champ proche rayonnant (ou zone de Fresnel) est située entre la région du champ proche réactif et celle du champ lointain. Dans cette zone, le champ évanescant n'existe plus. En revanche, le champ EM rayonné dépend encore de la distance d'observation. Les limites spatiales de cette zone dépendent de l'antenne considérée, mais on prend souvent $0,62\sqrt{D^3/\lambda}$ comme limite interne et $2D^2/\lambda$ comme limite externe. Enfin, dans la zone de champ lointain (ou zone de Fraunhofer), la distribution angulaire du champ EM est indépendante de la distance d'observation. Généralement, cette zone commence à partir d'une distance de $2D^2/\lambda$ de l'antenne.

Directivité et gain

Une antenne isotrope est un modèle théorique d'une antenne qui rayonne de manière constante dans toutes les directions de l'espace la puissance P_A fournie par l'alimentation. En réalité, l'énergie rayonnée par une antenne est répartie inégalement dans l'espace où certaines directions sont privilégiées. Ces directions sont dites lobes de rayonnement. Pour une antenne isotrope, la densité de puissance rayonnée par unité de surface est donnée par :

$$U_{iso}(r) = \frac{P_A}{4\pi r^2} \quad (1.52)$$

La directivité d'une antenne dans la direction (θ, ϕ) est le rapport entre la densité de puissance surfacique $U(r, \theta, \phi)$ rayonnée par l'antenne dans cette direction à la distance r et la densité de puissance qui serait rayonnée par une antenne isotrope rayonnant la même puissance totale. La directivité est donnée par l'équation (1.53) et s'exprime généralement en décibels :

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(r, \theta, \phi)}{U_{iso}(r)} = \frac{U(r, \theta, \phi)}{P_A/4\pi r^2} \quad (1.53)$$

Le gain $G(\theta, \phi)$ d'une antenne dans la direction (θ, ϕ) est proportionnel à la directivité. Il est défini comme :

$$G(\theta, \phi) = \eta D(\theta, \phi) \quad (1.54)$$

où η est le rendement (ou l'efficacité) de l'antenne.

Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions (θ, ϕ) de l'espace [Balanis, 2016]. Toutefois, ce diagramme de rayonnement est pratiquement très peu utilisé dans le contexte du GPR puisqu'il devient complexe à déterminer lorsque l'antenne est couplée au sol, et ce d'autant plus que ce diagramme de rayonnement dépendra des propriétés électriques du sol.

Impédance d'entrée et coefficient de réflexion

L'antenne est caractérisée par son impédance d'entrée Z_{in} qui n'est autre que le rapport entre la tension aux bornes de l'entrée de l'antenne (V_{in}) et le courant d'alimentation de celle-ci (I_{in}) à une fréquence donnée. Elle s'exprime comme :

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_{in} + jX_{in} \quad (1.55)$$

Une antenne est reliée à la source par une ligne de transmission d'impédance caractéristique Z_C ($Z_C = 50 \Omega$ en général). Le coefficient de réflexion (S_{11}) mesure la manière dont une onde EM créée par une source est transmise à l'antenne. Il est défini comme le rapport entre l'onde réfléchie en entrée de l'antenne et l'onde incidente. Le coefficient de réflexion est donné par :

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_C}{Z_{in} + Z_C} \quad (1.56)$$

Afin d'optimiser le transfert de puissance entre l'alimentation et l'antenne, il est nécessaire d'assurer une adaptation d'impédance. Cette opération permet d'annuler le coefficient de réflexion en entrée de l'antenne. Si l'adaptation n'est pas assurée, une partie de la puissance est renvoyée vers la source. On parle des pertes de désadaptation qui réduisent l'efficacité de l'antenne.

Bande passante

La bande passante (BP) d'une antenne correspond à la bande de fréquence où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est maximal. La bande passante peut être définie en fonction du coefficient de réflexion (S_{11}). Néanmoins, il n'existe pas un critère universel ou absolu pour la limite du coefficient de réflexion. Un critère typique utilisé est un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB sur la bande passante (voir figure 1.21), ce qui correspond à une transmission d'environ 90 % de l'énergie fournie par la source.

Le GPR fait partie des systèmes **Ultra Large Bande (ULB)**. En considérant la définition donnée par (1.57), il est communément admis que la bande passante d'un système **ULB** soit supérieure à 120% :

$$BP = \frac{2(f_{max} - f_{min})}{f_{max} + f_{min}} = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} \quad (1.57)$$

où f_{max} et f_{min} représentent respectivement les limites supérieure et inférieure de la bande passante à -10 dB et f_c la fréquence centrale.

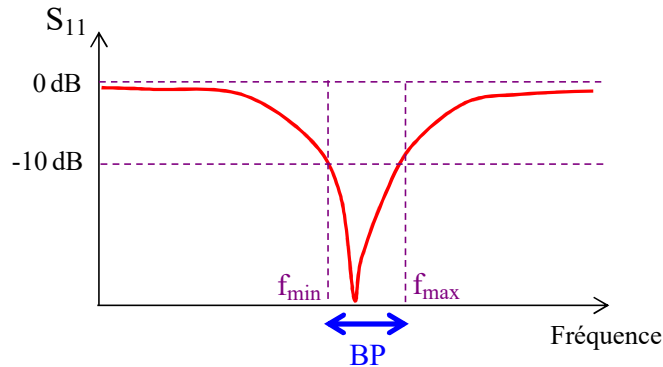


FIGURE 1.21 – Définition de la bande passante d'une antenne par le coefficient de réflexion.

Polarisation d'antenne

Comme illustré précédemment dans la figure 1.1, une onde plane émise par une antenne est décrite en champ lointain par trois vecteurs : les champs électrique et magnétique (\vec{E} et \vec{H}) et le vecteur d'onde (\vec{k}), qui est colinéaire à la direction de propagation. On définit la polarisation d'une onde **EM** comme la direction du champ électrique \vec{E} . La polarisation d'une antenne est définie par la polarisation de l'onde émise par celle-ci. On distingue trois types de polarisation différents [Nikolova, 2007] :

- La polarisation de l'antenne est dite linéaire (ou rectiligne) lorsque le champ électrique \vec{E} se propage en maintenant une direction constante dans le temps (figure 1.22a).
- La polarisation de l'antenne est dite circulaire lorsque le champ électrique \vec{E} décrit une hélice à section droite circulaire au cours du temps (figure 1.22b). Ce cercle peut être décrit en fonction du temps dans un sens ou dans l'autre : on parle alors de polarisation circulaire droite ou gauche.
- Dans le cas d'une polarisation elliptique, l'extrémité du vecteur \vec{E} décrit une ellipse lors de sa projection dans un plan orthogonal à la propagation (figure 1.22c). Comme pour la polarisation circulaire, on distingue la polarisation elliptique droite et gauche.

Notons que la polarisation d'une antenne est généralement définie pour le champ lointain, tout comme le diagramme de rayonnement. De plus, selon les types d'antennes, les différentes parties d'une antenne peuvent émettre des ondes de différentes polarisations. Dans le contexte du GPR, les différentes polarisations d'antennes sont souvent utilisées afin de caractériser des phénomènes anisotropes comme par exemple des failles géologiques ou des fissures.

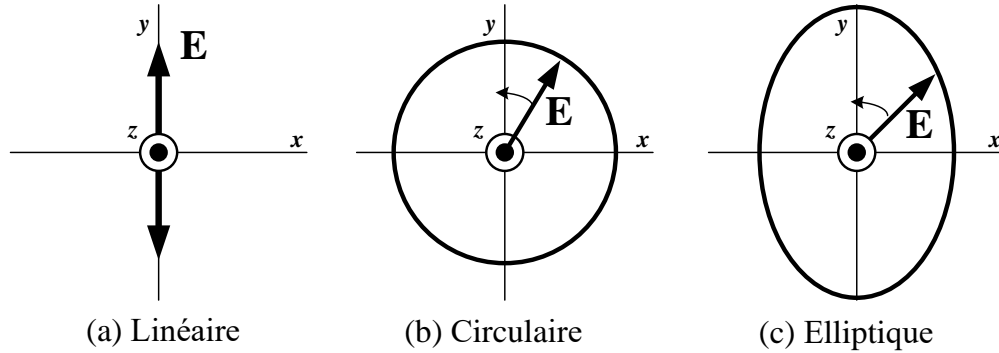


FIGURE 1.22 – Les différentes polarisations possibles d'une onde EM plane dans le cas où la direction de propagation k est parallèle à z (d'après Nikolova [2007]).

1.4.9.2 Principaux types d'antennes GPR

Nous présentons ici les types d'antennes classiquement utilisées dans les applications GPR. La liste des antennes présentées n'est pas exhaustive [Balanis, 2016]. A travers cette présentation, nous expliquons également le choix fait sur le type d'antenne retenu pour la réalisation des mesures au laboratoire dans le cadre de cette thèse.

Force est de noter que les antennes GPR peuvent fonctionner selon deux configurations : posées sur le sol (*ground-coupled*), ou surélevées (*air-coupled*). Ainsi, la présence du sol aura une influence directe sur les capacités et les caractéristiques de l'antenne qui varient selon le sol prospecté.

Antennes cornets

Une antenne de type cornet est un guide d'onde évasé à son extrémité de façon à créer une transition lisse d'impédance entre le guide d'onde et le milieu. La section du guide d'onde peut prendre différentes formes (rectangulaire, carrée, ...). La partie évasée de l'antenne peut également avoir une multitude de formes (linéaire, exponentielle, ...). Deux exemples d'antennes cornets avec des sections du guide d'onde et des parties évasées différentes sont présentés dans la figure 1.23 [Balanis, 2016].

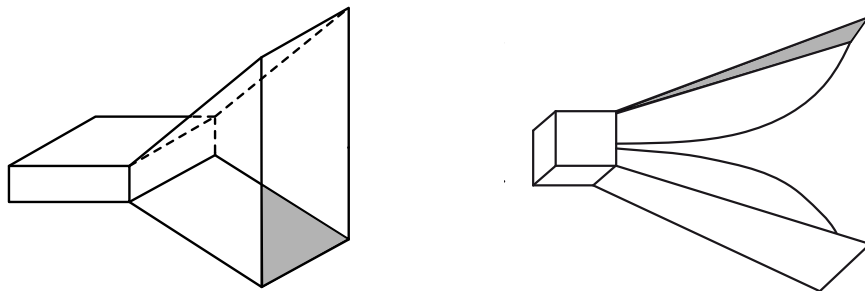


FIGURE 1.23 – Deux exemples d'antennes cornets.

Les antennes cornets sont intéressantes lorsque la fréquence centrale est assez élevée car les dimensions deviennent acceptables et la bande passante devient plus large. De plus, ces antennes sont très directives et ne souffrent pas de rayonnement arrière. Cependant, de par leur forme, elles sont très sensibles à la réflexion au niveau de l'interface air-sol, surtout dans des configurations de type *ground-coupled*. Ces antennes sont généralement utilisées pour l'inspection routière en configuration *air-coupled* et peuvent être montées sur un véhicule.

Antennes Vivaldi

L'antenne Vivaldi a été initialement introduite par [Gibson, 1979]. Une telle antenne possède un motif à ouverture qui permet un passage progressif de la ligne vers l'espace libre (figure 1.24). Elle peut être vue comme un cornet d'émission en deux dimensions à ouverture exponentielle. Les antennes Vivaldi sont connues pour être des antennes très large bande. Des bandes jusqu'à 5 octaves ont été rapportées par Stockbroeck and Vander Vorst [2000].

Une antenne Vivaldi peut être faite de minces feuilles de cuivre ou de circuits imprimés simple à double couche. Les caractéristiques de ce type d'antennes sont influencées par les dimensions et la géométrie de la ligne de fente, l'épaisseur du matériel conducteur ou encore la constante diélectrique du substrat. La polarisation d'une telle antenne est linéaire, et les lignes du champ électrique sont parallèles au substrat du circuit.

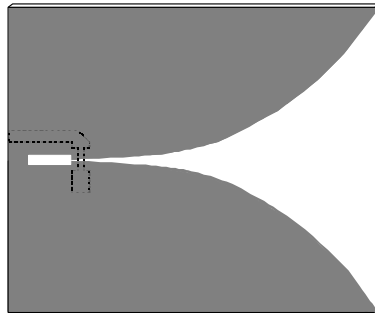


FIGURE 1.24 – Schéma d'une antenne Vivaldi avec une ligne d'alimentation micro-ruban.

Antennes papillon

Les antennes papillon (*bowtie*) sont fréquemment utilisées dans les systèmes GPR [Serhir and Lesselier, 2018]. Une telle antenne est classiquement composée d'un motif rayonnant métallique (généralement de forme triangulaire). La distribution des courants électriques se trouve concentrée sur les bords du motif rayonnant plus qu'à l'intérieur. Ainsi, un motif rayonnant particulier et son complémentaire (figure 1.25) auront des propriétés similaires, mais une polarisation différente.

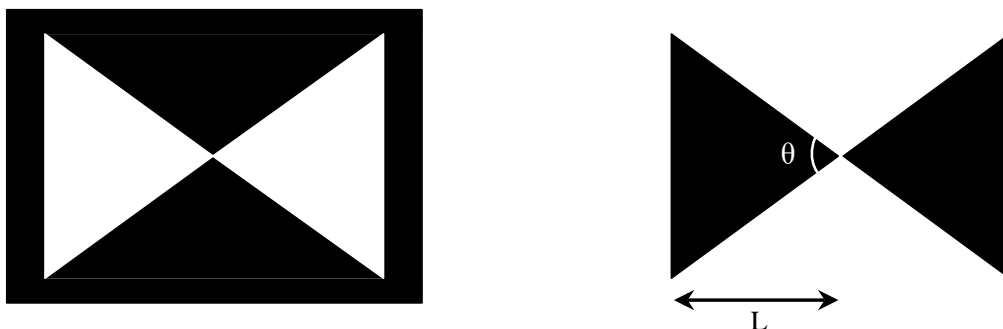


FIGURE 1.25 – Schéma d'une antenne papillon (à droite) et son complémentaire (à gauche).

En revanche, la variation des dimensions de l'antenne (la longueur L et l'angle θ) modifie ses caractéristiques comme la bande passante ou encore la fréquence de travail. De plus, l'ajout de résistances de part et d'autre de l'antenne élargit la bande passante et réduit les effets de « ringing » au détriment du rendement qui s'en retrouvera amoindri [Lestari et al., 2004].

Autres antennes

D'autres types d'antennes peuvent également être intégrées dans des systèmes GPR. On trouve par exemple des antennes spirales qui possèdent une phase non-linéaire en fréquence. Ces antennes sont souvent utilisées avec des radars SFCW [Thaysen et al., 2005].

Des antennes de type log-périodiques ont été également employées pour conduire des mesures GPR [Shan et al., 2010]. Le terme log-périodique vient du fait que les propriétés de ces antennes ont une périodicité fréquentielle de $\ln(\tau)$ où τ est le rapport d'homothétie entre deux éléments de l'antenne.

Plusieurs travaux ont été publiés sur le développement des antennes ULB dans le contexte du GPR comme Hertl and Strycek [2007] et Aguilera et al. [2013].

Choix de l'antenne pour la conduite de nos mesures au laboratoire

Pour l'utilisation du GPR dans le cadre de notre application, quatre objectifs techniques et pratiques ont été visés lors du choix de l'antenne :

1. L'antenne doit pouvoir émettre et recevoir des signaux GPR avec un spectre entre 300 MHz et 3 GHz ($S_{11} < -10$ dB).
2. L'antenne doit être capable d'opérer en mode *ground-coupled* pour maximiser le transfert d'énergie dans le sol et atteindre une pénétration de 60 cm quel que soit le type de sol.
3. L'antenne doit avoir des dimensions réduites et un poids relativement léger afin de garantir un degré de mobilité acceptable et s'adapter facilement à la surface du sol.
4. Enfin, le coût de production de l'antenne doit être réduit pour limiter le coût global du système de mesure.

Parmi la panoplie d'antennes disponible dans notre laboratoire, l'une des plus prometteuses pouvant répondre à l'ensemble de ces objectifs est l'antenne papillon. Nous avons ainsi fait le choix d'utiliser une telle antenne afin de réaliser les mesures au laboratoire de cette thèse. Une présentation détaillée des caractéristiques et performances de l'antenne employée sera fournie dans le chapitre 5.

1.5 Conclusion

Le principe du GPR réside dans l'analyse de l'interaction des ondes EM et les milieux auscultés. En effet, les ondes EM sont le support de l'information concernant la composition du milieu diélectrique sondé. Dans ce chapitre, nous avons brièvement rappelé les lois fondamentales de l'électromagnétisme permettant de comprendre le fonctionnement du radar GPR. La bonne connaissance de ces lois permettra de modéliser correctement les scénarios GPR afin de mieux comprendre les phénomènes EM dans le contexte de notre application.

Le principe de la méthode FDTD sur laquelle est basé le code de calcul de gprMax utilisé dans cette thèse a été également rappelé dans ce chapitre. Les principales conditions nécessaires au bon fonctionnement de la méthode ont été mises en exergue. Un point sur la situation du marché du GPR a permis de démontrer l'intérêt porté dernièrement à cette technologie. Enfin, après avoir décrit le principe de fonctionnement ainsi que les différentes technologies du GPR (temporelle et fréquentielle), l'accent a été mis sur la partie antennaire du système. Ceci a permis d'identifier les critères qui nous ont conduits à choisir l'antenne adéquate à notre application.

Dans le chapitre suivant, nous allons voir comment la technologie GPR pourrait être un outil très prometteur pour l'écosystème forestier à travers un contrôle non-invasif du système racinaire des arbres.

Bibliographie

- Aguilera, P., Ait Ou Kharraz, M. and Serhir, M. [2013]. On the comparison of UWB antennas for GPR applications, *3rd SONDRRA Workshop, Hyères - La Londe les Maures*. 30
- Annan, A. P. [2005]. Ground-Penetrating Radar, in D. K. Butler (ed.), *Near-Surface Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, chapter 11, pp. 357–438. 2
- Bailey, J., Evans, S. and Robin, G. d. Q. [1964]. Radio echo sounding of polar ice sheets, *Nature* **204**(4957) : 420–421. 14
- Balanis, C. A. [2016]. *Antenna Theory : Analysis and Design*, 4th edn, John Wiley & Sons. 25, 26, 28
- Bentley, C. R. [1964]. The structure of Antarctica and its ice cover, *rege* **2** : 335. 14
- Cassidy, N. J. [2009]. Ground penetrating radar data processing, modelling and analysis, in H. M. Jol (ed.), *Ground Penetrating Radar : Theory and Applications*, Elsevier, pp. 141–176. xiii, 2, 8, 25
- Clementi, G., Migliaccio, C., Fortino, N., Dauvignac, J., Willebois, J. and Chekroun, C. [2014]. Wideband antenna for land-mine detection radar, *Radar 2014 - International Radar Conference, Lille*, p. 7060275. 14
- Dabas, M., Camerlynck, C., Bossuet, G., Pétrequin, P. and Bailly, M. [1999]. Détection par méthode radar de niveaux anthropiques du néolithique final sous le niveau actuel du lac de Chalain (France), *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science* **328**(8) : 509–514. 14
- Daniels, D. J. [2005]. Ground Penetrating Radar, in K. Chang (ed.), *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*, Wiley Online Library. 2
- Daniels, D. J. [2006]. A review of GPR for landmine detection, *Sensing and Imaging* **7**(3) : 90. 14
- Dérobot, X., Lataste, J.-F., Balayssac, J.-P. and Laurens, S. [2017]. Evaluation of chloride contamination in concrete using electromagnetic non-destructive testing methods, *NDT & E International* **89** : 19–29. 14
- El-Said, M. [1956]. Geophysical prospection of underground water in the desert by means of electromagnetic interference fringes, *Proceedings of the IRE* **44**(1) : 24–30. 14
- Giannakis, I., Giannopoulos, A. and Warren, C. [2016]. A realistic FDTD numerical modeling framework of ground penetrating radar for landmine detection, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **9**(1) : 37–51. 14
- Giannopoulos, A. [1997]. *The Investigation of Transmission-Line Matrix and Finite-Difference Time-Domain Methods for the Forward Problem of Ground Probing Radar*, PhD thesis, University of York. 5, 11
- Gibson, P. [1979]. The Vivaldi aerial, 1979 *9th European Microwave Conference, Brighton*, IEEE, pp. 101–105. 29
- Goodman, D., Nishimura, Y. and Rogers, J. D. [1995]. GPR time slices in archaeological prospection, *Archaeological Prospection* **2**(2) : 85–89. 14
- Guo, L., Chen, J., Cui, X., Fan, B. and Lin, H. [2013]. Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification : a review, *Plant and Soil* **362**(1-2) : 1–23. 14
- Hertl, I. and Strycek, M. [2007]. UWB antennas for ground penetrating radar application, 2007 *19th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications, Dubrovnik*, p. 4544458. 30

- Lestari, A. A., Yarovoy, A. G. and Ligthart, L. P. [2004]. RC-loaded bow-tie antenna for improved pulse radiation, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **52**(10) : 2555–2563. [30](#)
- Liu, X., Serhir, M. and Lambert, M. [2018]. Detectability of junctions of underground electrical cables with a ground penetrating radar : Electromagnetic simulation and experimental measurements, *Construction and Building Materials* **158** : 1099–1110. [14](#)
- Morey, R. M. [1974]. Continuous subsurface profiling by impulse radar, *Proceedings of the Engineering Foundation Conference*, pp. 213–232. [14](#)
- Nikolova, N. [2007]. Lecture Notes, Polarization and Related Antenna Parameters. www.ece.mcmaster.ca/faculty/nikolova/. [vii](#), [27](#), [28](#)
- Noon, D. A. [1996]. *Stepped-Frequency Radar Design and Signal Processing Enhances Ground Penetrating Radar Performance.*, PhD thesis, The University of Queensland, Australia. [20](#)
- Oristaglio, M., Miller, D. E. and Haldorsen, J. [2001]. Ground Probing Radar, in E. Pike and P. Sabatier (eds), *Scattering - Scattering and Inverse Scattering in Pure and Applied Science*, 1st edn, Elsevier, pp. 448–466. [vii](#), [21](#)
- Saintenoy, A., Schneider, S. and Tucholka, P. [2008]. Evaluating ground penetrating radar use for water infiltration monitoring, *Vadose Zone Journal* **7**(1) : 208–214. [14](#)
- Serhir, M. and Lesselier, D. [2018]. Wideband reflector-backed folded bowtie antenna for ground penetrating radar, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **66**(3) : 1056–1063. [29](#)
- Shan, L., Xiaofeng, L. and Jinghui, Q. [2010]. A novel miniaturized ultra wideband log-periodic antenna, *2010 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, Sevastopol*, IEEE, pp. 246–248. [30](#)
- Skolnik, M. I. [1990]. *Radar Handbook*, 2nd edn, McGraw-Hill (New York), chapter 2. [16](#)
- Steenenson, B. O. [1951]. *Radar Methods for the Exploration of Glaciers*, PhD thesis, California Institute of Technology. [14](#)
- Stockbroeck, B. and Vander Vorst, A. [2000]. Copolar and cross-polar radiation of Vivaldi antenna on dielectric substrate, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **48**(1) : 19–25. [29](#)
- Taflove, A. and Hagness, S. C. [2005]. *Computational Electrodynamics : the Finite-Difference Time-Domain Method*, Artech House. [10](#)
- Terrasse, G., Nicolas, J.-M., Trouvé, E. and Drouet, É. [2016]. Automatic localization of gas pipes from GPR imagery, *2016 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Budapest, Hungary*, IEEE, pp. 2395–2399. [14](#)
- Thaysen, J., Jakobsen, K. B. and Lenler-Eriksen, H.-R. [2005]. Wideband cavity backed spiral antenna for stepped frequency ground penetrating radar, *2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Washington DC*, Vol. 1, IEEE, pp. 418–421. [30](#)
- Warren, C., Giannopoulos, A. and Giannakis, I. [2016]. gprMax : Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for ground penetrating radar, *Computer Physics Communications* **209** : 163–170. [11](#)
- Warren, C., Giannopoulos, A., Gray, A., Giannakis, I., Patterson, A., Wetter, L. and Hamrah, A. [2019]. A CUDA-based GPU engine for gprMax : Open source FDTD electromagnetic simulation software, *Computer Physics Communications* **237** : 208–218. [14](#)

Wu, K., Rodriguez, G. A., Zajc, M., Jacquemin, E., Clément, M., De Coster, A. and Lambot, S. [2019]. A new drone-borne GPR for soil moisture mapping, *Remote Sensing of Environment* **235** : 111456. [14](#)

Yee, K. [1966]. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **14**(3) : 302–307. [9](#)

Chapitre 2

Le système racinaire : caractérisation et techniques d'investigation

*« It is in the roots, not the branches,
that a tree's greatest strength lies. »*

Matshona Dhliwayo

Sommaire

2.1 Introduction	36
2.2 Compréhension du système racinaire	36
2.2.1 Qu'est-ce qu'un système racinaire?	36
2.2.2 Architecture racinaire et distribution spatiale	38
2.2.3 Santé et stabilité de l'arbre	40
2.3 Racines et environnement	42
2.3.1 Problèmes liés au génie civil	42
2.3.2 Biomasse racinaire dans l'écosystème forestier	44
2.4 Comparaison des différentes techniques d'étude du système racinaire	45
2.4.1 Techniques destructives	45
2.4.2 Techniques non-destructives	47
2.5 Utilisation du GPR pour l'imagerie des racines et l'estimation de biomasse	52
2.6 Conclusion	57

2.1 Introduction

Afin d'adapter utilisation du GPR au contexte de l'étude des racines, et pour mieux formuler nos hypothèses de départ, il est nécessaire d'acquérir une connaissance approfondie des systèmes racinaires des arbres et de leurs interactions avec l'environnement. Dans ce sens, le chapitre présent est consacré à l'analyse du système racinaire des arbres, sa fonction, son architecture, les problèmes qu'il cause à son environnement et le rôle qu'il joue dans l'écosystème terrestre. En complément, une étude comparative des différentes techniques géophysiques qui permettent l'étude du système racinaire est fournie. L'ensemble de ces techniques est classé en deux catégories : des méthodes destructives, qui sont directes mais laborieuses et chronophages, et surtout, comme leur nom l'indique, destructives pour les racines et le sol environnant ; et puis de l'autre côté, des méthodes non-destructives, qui permettent une observation continue et à long terme des racines avec un minimum de perturbations.

La suite de ce chapitre se focalise sur l'utilisation du GPR comme l'une des techniques non-destructives les plus fiables pour l'inspection des racines. Une revue bibliographique des études réalisées par la communauté GPR pour diverses fréquences et types de sol est conduite et présentée. Cet état de l'art a permis, entre autres, de faire le point sur les performances atteignables par le GPR en termes de profondeur et de résolution.

2.2 Compréhension du système racinaire

2.2.1 Qu'est-ce qu'un système racinaire ?

Les arbres sont constitués d'une partie aérienne structurée généralement par différents types d'axes, dont un tronc qui porte des organes (branches ou feuilles) et d'une partie souterraine également structurée par différents types racinaires. Le collet est une zone de transition entre ces deux parties. La seconde partie, généralement souterraine, constitue le système racinaire des arbres. Néanmoins, certaines espèces possèdent des racines en partie ou en totalité aériennes (des racines échasses, contreforts ou pneumatophores) [Dorval, 2015].

La racine est un axe qui croît habituellement vers le bas (géotropisme positif), et en fuyant la lumière (phototropisme négatif). C'est un organe non chlorophyllien qui assure trois fonctions essentielles :

1. La première fonction est celle l'ancrage et la fixation de l'arbre dans le sol, assurée par les grosses racines ligneuses dont la configuration s'adapte aux contraintes de l'environnement [Coutts, 1983].
2. La seconde fonction est le stockage des réserves, comme le carbone et l'azote qui seront nécessaires pour la renaissance de l'arbre au printemps [Brunner and Godbold, 2007].
3. La dernière fonction est celle qui consiste à assurer l'alimentation en eau et la nutrition minérale de l'arbre à partir des ressources du sol [Pallardy, 2010]. De là, la santé du système racinaire, et par conséquent celle de l'arbre, est étroitement liée aux conditions du sol.

L'architecture racinaire d'un arbre est composée de structures complexes, mais s'organise généralement autour de deux réseaux de racines :

- Racines ligneuses : d'un diamètre qui peut aller de quelques millimètres à plusieurs décimètres, elles se distinguent par une structure plus rigide et constituent ainsi ce qu'on pourrait appeler le squelette du système racinaire. Ces racines ont un rôle structurel, car elles sont essentiellement responsables de l'ancrage de l'arbre dans le sol, et leur durée de vie est pérenne [Pallardy, 2010]. Lors des saisons froides, ce sont ces racines qui garderont en elles les réserves nécessaires au redémarrage lors du printemps. Cette fonction de la racine ligneuse est extrêmement importante dans les régions ayant des hivers très froids. En effet, l'arbre en dormance doit être prêt à se refournir rapidement lors du printemps pour ne pas se trouver pénalisé en sucres photo-synthétisés. Un manque à cette fonction vitale peut entraîner une dégradation de la santé de l'arbre aux changements de saisons [Arboplus, 2015].

- Racines fines : dites aussi racines absorbantes, elles sont responsables de l'absorption d'eau et de nutriments, de la synthèse de l'hormone d'enracinement, de l'exsudation racinaire et de la symbiose avec les micro-organismes du sol. Contrairement aux racines ligneuses, elles ne subissent pas d'épaississement secondaire, et sont généralement de petit diamètre (< 2 mm). La durée de vie des racines fines varie de quelques jours à plusieurs semaines, selon les conditions du sol et la température [Pallardy, 2010].

D'un point de vue morphologique, la racine est constituée essentiellement de trois parties : la stèle (composées du xylème, phloème, moelle et délimitée par l'endoderme), le cortex (qui entoure le cylindre vasculaire) et l'épiderme (la couche extérieure). Ces différentes composantes sont illustrées sur la figure 2.1 qui montre une coupe transversale d'une racine.

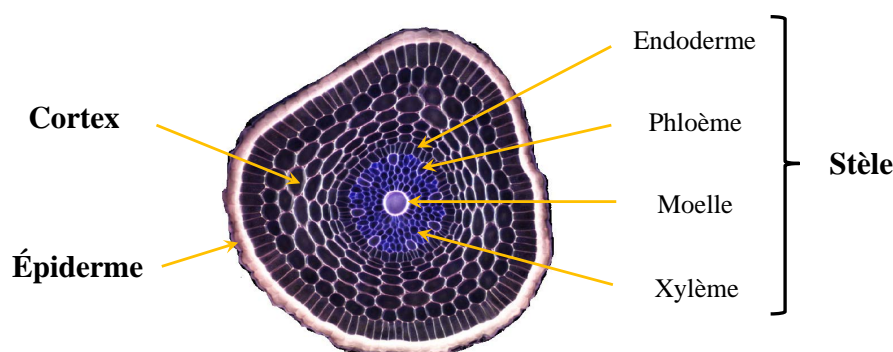


FIGURE 2.1 – Anatomie de la racine montrée via une coupe transversale (modifié de Gregory [2006]).

Par ailleurs, l'eau est le facteur le plus limitant de la croissance et de la productivité des arbres, et l'un des principaux déterminants de la répartition spatiale des racines dans leur milieu de croissance. L'importance de l'eau pour les arbres découle de son rôle central dans la croissance et la photosynthèse. Malgré cette dépendance, les arbres retiennent moins de 5% de l'eau absorbée par les racines pour l'expansion cellulaire et la croissance des parties composantes. Le reste est transmis directement dans l'atmosphère par *transpiration* et photosynthèse. La quantité d'eau réinjectée par l'arbre dans l'atmosphère peut être incroyablement élevée. A titre d'exemple, une seule plante de maïs irriguée peut utiliser 200 litres d'eau pendant un été typique, tandis que certains grands arbres de la forêt tropicale peuvent utiliser jusqu'à 1200 litres d'eau en une seule journée.

Nous verrons plus tard dans le chapitre 3, que la teneur en eau d'une racine consiste un élément décisif pour que celle-ci puisse être détectée par le GPR. Il s'avère donc utile de rappeler à ce niveau, comment les racines absorbent l'eau au sein de leur environnement. En effet, l'eau pénètre dans la racine sous l'effet de deux phénomènes dits passifs :

- Premier phénomène : Une poussée s'appuyant sur le mécanisme d'osmose. Il s'agit du mécanisme de passage de l'eau du milieu le moins concentré en sels minéraux (le sol) vers le milieu le plus concentré en sels minéraux (la racine). Ainsi, l'eau pénètre dans les racines en raison d'une différence de dilution entre la rhizosphère¹ et les tissus racinaires. Le phénomène est illustré par la figure 2.2.
- Second phénomène : une succion exercée par les besoins en eau des parties aériennes. En effet, la transpiration, la photosynthèse, le transport de l'eau dans la structure de l'arbre créent une demande d'eau qui, du fait de la cohésion des molécules d'eau entre elles (la capillarité²), se répercute des éléments aériens jusqu'aux racines fines absorbantes.

1. Partie du sol proche des racines, caractérisée par sa biodiversité microbienne et sa richesse en bactéries et champignons microscopiques.

2. La capillarité signifie la propension des liquides à progresser spontanément dans les milieux poreux (les tissus) ainsi que dans les tubes de moins de 1 millimètre de diamètre.

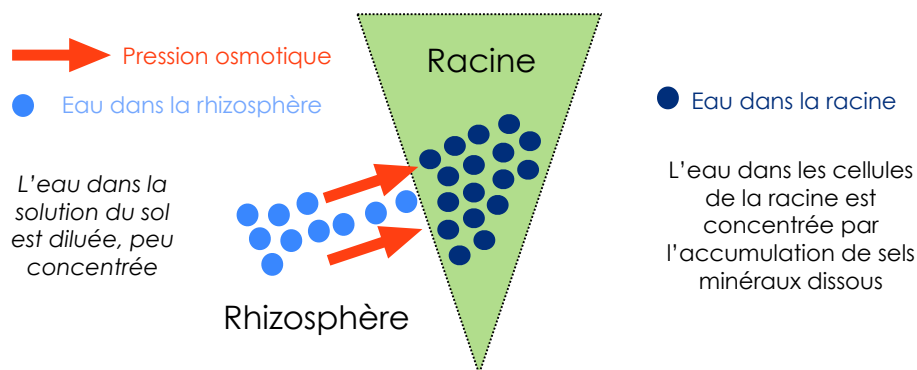


FIGURE 2.2 – Illustration du phénomène d'osmose entre la rhizosphère et la racine.

2.2.2 Architecture racinaire et distribution spatiale

L'architecture du système racinaire des arbres suit des règles de construction et de développement déterminées par deux facteurs clés [Stone and Kalisz, 1991] :

1. Le modèle architectural spécifique à l'espèce

Chaque espèce végétale développe préférentiellement certains types d'architecture racinaire. Chez les arbres forestiers des régions tempérées, trois principales catégories de systèmes racinaires ont été identifiés sur la base de la forme générale du système racinaire d'arbres adultes [Dorval, 2015] :

- Les systèmes racinaires en cœur (figure 2.3-A), dont toutes les racines sous différentes orientations (verticales ou horizontales) sont émises à la base de l'arbre, comme le cas du chêne rouge (*Quercus rubra*).
- Les systèmes racinaires formant une plaque sol-racines dont les racines horizontales se développent à la base du tronc entourant le système racinaire, comme le cas de l'épicéa de Sitka (*Picea sitchensis*). Des racines pivotantes sont émises de celles horizontales (figure 2.3-B).
- Les systèmes racinaires pivotants qui émettent une grosse racine verticale dite pivot orientée dans le sens de prolongement de la tige qui assure la fixation de l'arbre (comme le cas du pin maritime (*Pinus pinaster*). Ce cas est illustré par la figure 2.3-C.

Les racines formant le système racinaire, comme pour le système des branches aériennes, peuvent se décomposer en ordre de ramification. Le pivot est compté comme ordre 1. Les ordres 2 seront insérés latéralement sur l'ordre 1 puis les ordres 3 seront insérés sur les ordres 2 et ainsi de suite.

2. Les contraintes rencontrées dans le sol

Concernant la distribution verticale, la pénétration vers le bas des racines peut être entravée par des sols mal aérés ou trop denses, par la présence de couches rocheuses ou encore par des basses températures du sol. Stone and Kalisz [1991] ont mené une étude approfondie sur les racines des arbres, passant en revue la littérature existante et effectuant des relevés sur le terrain sur une grande variété d'espèces d'arbres, démontrant que l'étendue des racines est strictement liée aux conditions du site. En effet, il a été démontré que de nombreuses espèces peuvent atteindre des profondeurs considérables si elles ne sont pas limitées par les caractéristiques du sol. Selon Jackson et al. [1996], il peut y avoir des différences importantes dans les profondeurs d'enracinement, selon les caractéristiques du milieu environnant : les profils d'enracinement sont les moins profonds dans les forêts boréales, les prairies tempérées et la Toundra, en raison non seulement des caractéristiques pratiques de l'humidité et de l'aération du sol, mais aussi la présence de barrières physiques à la croissance verticale des racines, comme le pergélisol dans la Toundra et certaines forêts boréales.

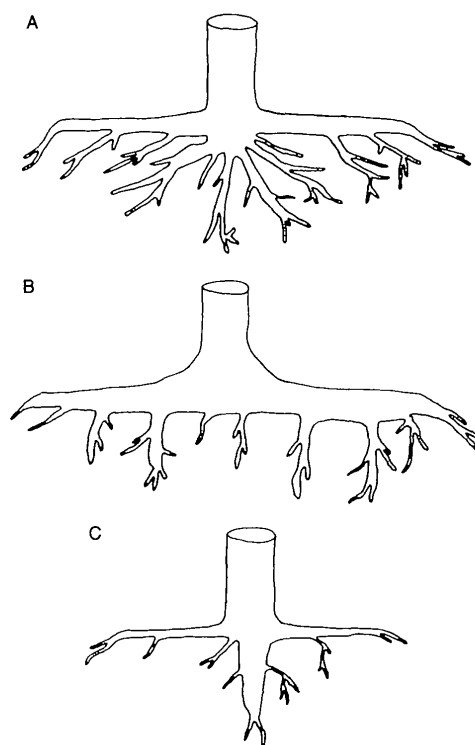


FIGURE 2.3 – Les 3 principaux modèles racinaires : (A) système en coeur, (B) système de plaque sol-racine avec de grosses racines traçantes et des pivots et (C) système racinaire pivotant avec un pivot important et de plus petites racines traçantes (d'après Stokes and Mattheck [1996]).

D'un autre côté, la distribution des racines est plus profonde dans les déserts et les zones les plus sèches, car le manque d'eau et de nutriments dans le sous-sol peu profond, associé à des températures de surface du sol extrêmes, inhibe le développement des racines dans les couches supérieures du sol et les oblige à approfondir [Nobel, 2003]. Quoi qu'il en soit, il y a sans aucun doute une tendance pour que les racines des arbres soient concentrées à proximité de la surface [Wilson, 1964] étant donné que cette zone est généralement mieux aérée, humide et contient une concentration de minéraux plus élevée que les couches plus profondes. De son côté, Pallardy [2010] indique que la densité racinaire est souvent plus élevée dans les 30 premiers centimètres sous la surface du sol.

Jackson et al. [1996] présentent un modèle qui décrit la distribution verticale des racines basé sur l'équation asymptotique (2.1) :

$$Y = 1 - \beta^d \quad (2.1)$$

où Y est la proportion cumulée de racines entre la surface du sol et la profondeur d (en cm), et β est un coefficient sans dimension déterminé empiriquement. Des valeurs élevées de β (comme 0,98) correspondent à une proportion importante de racines à une certaine profondeur, des valeurs faibles de β (comme 0,90) impliquent une proportion importante de racines proche de la surface du sol. La figure 2.4 montre la variation de la proportion cumulée de racines de certains types d'arbres examinés avec les valeurs de β correspondantes (extraites de Jackson et al. [1996]). À partir de cette figure nous pouvons noter que le pourcentage de la biomasse racinaire concentrée dans les 30 premières centimètres du sol est de 53%, 70% et 93% pour un arbre de Toundra, de forêt tropicale et de désert, respectivement. D'autre part, 90% de la biomasse racinaire pour ces trois types d'arbres est concentrée respectivement à 26 cm, 58 cm et 91 cm.

En ce qui concerne la distribution horizontale, la propagation des racines semble être moins liée à la température et aux caractéristiques du sol. En effet, l'étendue du développement racinaire semble dépendre des espèces d'arbres, mais aussi de la présence d'espèces concurrentes

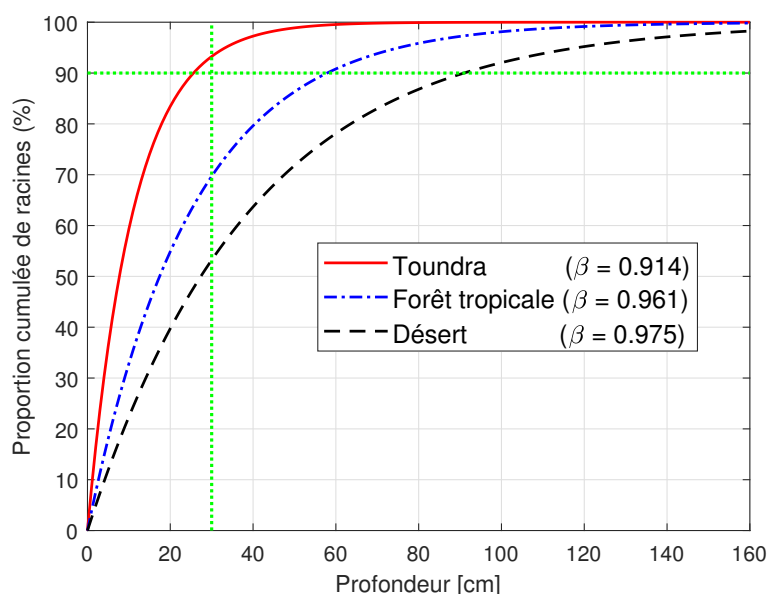


FIGURE 2.4 – Proportion cumulée de racines pour différents types d'arbres.

[Shainsky and Radosevich, 1992]. De nombreuses règles d'or ont été présentées pour estimer la propagation des racines. Parmi les plus courantes on trouve la relation entre l'étendue des racines et le diamètre du tronc, conduite par Day et al. [2010] et qui a estimé l'étendue des racines à un rapport de 38 :1 par rapport au diamètre du tronc de l'arbre. La même étude affirme que la hauteur de l'arbre n'est pas un élément prédictif de l'étendue des racines. Une autre étude conduite par Gilman [1988] résulte en une relation entre l'étendue des racines et celle des branches de l'arbre. Elle affirme que l'étendue maximale moyenne des racines est de 2,9 fois supérieure à l'étendue des branches, et que les racines poussant le plus loin du tronc se trouvent toujours près de la surface du sol.

Cependant, Stone and Kalisz [1991] ont rapporté de nombreux exemples d'extensions radiculaires latérales maximales de plus de 30 m du tronc, et dans certains cas plus de 50 m. Cela semble démontrer que les racines ont tendance à explorer la plus grande surface de sol possible afin d'exploiter ses ressources et d'assurer l'ancrage et la stabilité de l'arbre. Ces estimations supposent généralement qu'il existe peu d'obstacles physiques importants à l'étendue des racines. En revanche, peu de travaux ont été effectués sur la manière dont les différents arbres se font concurrence pour l'absorption d'eau et de minéraux lorsque les systèmes racinaires entrent en contact les uns avec les autres.

2.2.3 Santé et stabilité de l'arbre

Les maladies des arbres font partie intégrante des écosystèmes naturels, car elles régulent le développement des forêts [Hansen and Goheen, 2000]. La coexistence de plantes et d'agents pathogènes est donc nécessaire à la survie des deux. Cependant, les activités humaines ont souvent modifié l'équilibre naturel, brisant les barrières géographiques qui avaient préservé les écosystèmes et permettant le mouvement des espèces sauvages [Richardson et al., 2000]. Aussi, des agents pathogènes exotiques et des champignons ont pu envahir des régions entières [Santini et al., 2013], parfois avec des conséquences dévastatrices, comme dans le cas de brûlure du châtaignier [Anagnostakis, 1987]. De manière générale, la dégradation des racines entraîne un mauvais approvisionnement de l'arbre en eau et en nutriments, ce qui l'affaiblit. De plus, un risque indirect réside dans la chute de l'arbre dont le soutien disparaît. De telles maladies ont non seulement de graves conséquences écologiques, mais elles peuvent également avoir des répercussions économiques [Aukema et al., 2011].



FIGURE 2.5 – Collet et racines d'un pommier atteint par une infection fongique (*root rot*).

D'après Hansen and Goheen [2000], les infections fongiques sont l'une des principales causes de maladie des racines. Celles-ci contaminent généralement des arbres qui ont déjà été affaiblis par d'autres facteurs, tels que d'autres ravageurs ou des changements climatiques [Williams, 1986]. Un certain nombre d'agents pathogènes est capable de pénétrer l'écorce (processus à la fois mécanique et enzymatique), provoquant la pourriture des racines et infectant les tiges inférieures des arbres (figure 2.5). Outre l'entrée par la pénétration de l'écorce, une autre voie d'entrée importante regroupe les blessures, fréquentes au contact des cailloux ou provoquées par la faune du sol (insectes, petits animaux) et bien sûr par l'activité humaine [Drénou, 2006].

D'autre part, la stabilité de l'arbre repose sur un développement efficient du système racinaire qui fournit son ancrage à l'arbre en interaction avec le sol. La stabilité mécanique d'un arbre est sa capacité à résister aux forces mécaniques, principalement son poids et le vent, tout au long de sa vie [James et al., 2006]. Les forces exercées sur la partie aérienne sont transférées vers la partie souterraine par le tronc. La figure 2.6 illustre les différentes forces subies par un arbre sous la charge du vent. Afin de minimiser le risque de déracinement de l'arbre, voici les facteurs importants qu'il

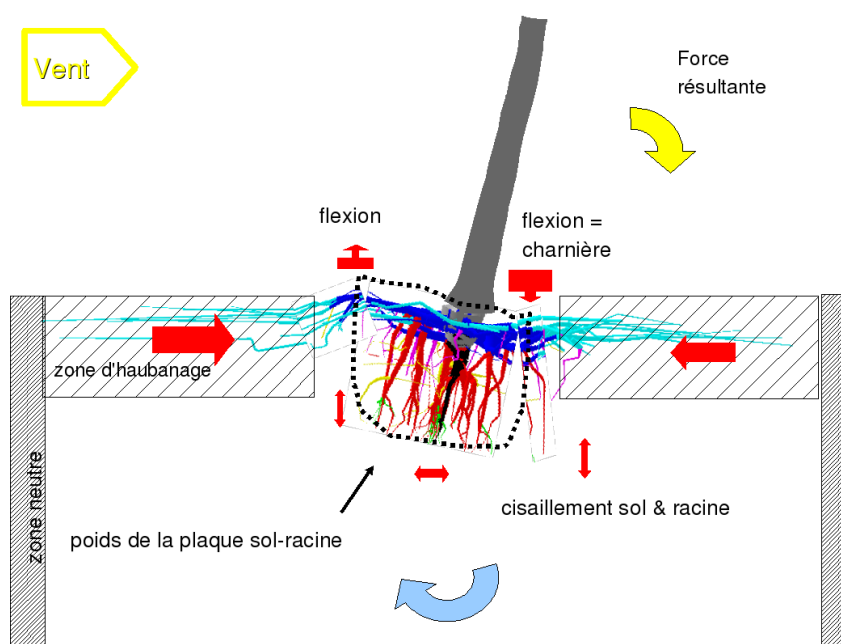


FIGURE 2.6 – Schéma illustrant les forces subies sous l'effet du vent par le système racinaire d'un arbre de grande taille en sol sableux. (d'après Danjon and Fourcaud [2009]).

faut assurer : 1) les racines doivent être suffisamment solides en coupe pour résister au cisaillement; 2) les racines dans la direction du vent (*windward*) doivent résister à l'arrachement du sol et à la rupture de la tension; 3) les racines sous le vent (*leeward*) doivent résister à l'articulation en compression et au cisaillement; 4) le poids de l'arbre poussant dans le sol doit être suffisamment important.

Les arbres modifient constamment leur croissance aérienne et racinaire en réponse à des stimuli mécaniques et leur environnement en général. On observe alors une modification de la forme de la racine traduite par une augmentation de la croissance radiale en fonction de la sollicitation. Ainsi, lorsque la sollicitation mécanique n'est pas répartie de façon homogène (à cause de la charge du vent), la croissance radiale des racines est fonction de leur positionnement dans la structure [Coutts, 1983]. Comme montré sur la figure 2.7, la surface en section obtenue pouvant ressembler à un I ou à un T, augmentant ainsi, pour une surface en section donnée, la résistance à la flexion de la racine.



FIGURE 2.7 – Sections transversales de racines de structure avec une forme (a) circulaire, (b) en T et (c et d) en I chez le pin maritime (a, b et c) et l'épinette noire (d) (d'après Saint Cast [2019]).

2.3 Racines et environnement

2.3.1 Problèmes liés au génie civil

Bien qu'ils soient une présence essentielle dans les sites urbains et archéologiques, les arbres peuvent également endommager les structures urbaines. De manière générale, les racines qui ont le plus le potentiel de causer des dommages aux structures sont les ligneuses, notamment par l'application d'une pression sur la fondation. Quant aux racines fines, celles-ci sont extrêmement fragiles et sont incapables de percer ou pénétrer quoi que ce soit. La seule condition pour qu'une racine fine puisse causer des dommages à une structure est la présence au préalable de dommage dans la structure. La présence d'une fissure pourrait en effet permettre à une racine fine de s'infiltrer et d'aggraver le problème.

Constructions

Les arbres peuvent causer des dommages directs ou indirects aux constructions. Les dommages directs aux bâtiments et aux structures peuvent être causés par un contact direct avec les racines des arbres, bien que les fondations de la plupart des bâtiments modernes soient actuellement capables de résister à une telle activité. Cela est plus susceptible de se produire près du tronc de l'arbre, car la pression exercée par les racines peut atteindre jusqu'à $8 \times 105 \text{ N/m}^2$, mais diminue rapidement avec la distance [MacLeod and Cram, 1996]. Cela se produit généralement lorsque les arbres se voient attribuer un espace inadéquat : à mesure que l'arbre grandit, les racines commencent à se propager et à se frayer un chemin sous les bâtiments (figure 2.8), car la teneur en humidité y est souvent plus élevée que dans le sol environnant, surtout durant les saisons sèches.



FIGURE 2.8 – Racines d'arbres se développant sous des bâtiments.

Canalisations

Les canalisations souterraines sont souvent obstruées ou endommagées par la croissance des racines. Ces dommages se produisent généralement dans les anciens systèmes, car ceux-ci ont été construits avec des matériaux qui pourraient se détériorer avec le temps, comme les briques ou le béton. De plus, les racines sont attirées par la présence d'humidité autour des tuyaux, qui sont généralement plus froids que le sol environnant et ont tendance à se développer autour du tuyau (figure 2.9).

Les canalisations modernes sont faites de plastique, de fer ou de béton armé, qui ne risquent pas d'être endommagées par la pression des racines. Toutefois, les fuites potentielles dues, par exemple, à un joint cassé ou à une mauvaise construction peuvent entraîner la pénétration des racines dans le tuyau, finissant par le bloquer [Randrup et al., 2001].



FIGURE 2.9 – Dommages causés par les racines aux canalisations.

Chaussées

Le développement racinaire peut provoquer des perturbations aux surfaces de la route, comme la fissuration ou le soulèvement (figure 2.10). Ce type d'endommagements peut avoir des conséquences assez sérieuses, conduisant à un entretien supplémentaire de la chaussée ou réparation et interventions sur l'arbre.

L'une des principales causes de conflit entre les racines et les infrastructures semble être l'espace limité prévu pour le développement des arbres. La taille des arbres à maturité doit être prise en compte lors du choix des espèces d'arbres à planter, car elle influencera le volume de sol nécessaire [Trowbridge and Bassuk, 2004]. Enfin, lorsque de grands arbres sont plantés dans les villes, il existe un danger important de projection à cause du vent, car les racines des arbres sont souvent coupées lors des réparations de la chaussée et ne peuvent donc pas offrir une résistance suffisante à la charge du vent. Par conséquent, une sélection d'espèces convenablement adaptées aux conditions du site est recommandée, car cela peut conduire à une réduction significative des dangers. Cependant, McPherson and Peper [2000] affirment que cette solution réduirait considérablement les avantages des gros arbres.



FIGURE 2.10 – Dommages causés par les racines aux chaussées en milieu urbain.

2.3.2 Biomasse racinaire dans l'écosystème forestier

Au cours de la vie d'un arbre, la proportion de biomasse racinaire par rapport à la biomasse totale augmente au cours des 5 à 10 premières années, diminue brutalement ensuite et reste à un niveau stable une fois que l'arbre atteint sa maturité [Drénou, 2006]. Chez l'arbre mature, de nombreuses études s'accordent pour considérer que la biomasse racinaire représente approximativement 20% de la biomasse totale de l'arbre.

Par ailleurs, le carbone est au cœur des discussions internationales sur l'effet de serre et le changement climatique. Dans ce sens, la forêt assure un rôle primordial en captant les composés atmosphériques contenant du carbone ou en libérant du dioxyde de carbone par respiration, décomposition et par combustion [Colin and Derrière, 2005]. En raison de leur durée de vie et de leurs dimensions relativement importantes, les arbres sont de véritables réserves de carbone. La forêt permet un stockage de carbone à long terme sur une faible surface, aussi bien dans le sol que dans la biomasse. Les autres terres stockent environ 14% de carbone de plus que la forêt, mais sur une surface triple [Colin and Derrière, 2005].

En ce qui concerne le sol, sa fonction ne se réduit pas qu'au support de la vie végétale et animale, mais possède en réalité un fonctionnement analogue à celui d'un organisme vivant. La production moyenne de gaz carbonique (CO_2) dans le sol est estimée à 15 t/ha/an, les deux tiers étant dus à l'activité microbienne [Drénou, 2006]. Ce CO_2 a tendance à s'accumuler en profondeur et sa teneur dans le sol est de 6 à 30 fois supérieure à celle de l'atmosphère. Si le sol est suffisamment aéré (ce qui sous-entend une intense activité biologique), une partie du CO_2 est rejetée dans l'atmosphère et l'entrée de l'oxygène est favorisée. Rappelons que le principal facteur d'expansion des racines est la présence d'oxygène.

En ce qui concerne les quantités de carbone stocké dans le compartiment racinaire, Huet et al. [2004] a apporté des éléments de réponse dans le cas d'une hêtraie atlantique. À 8 ans, la biomasse racinaire en carbone est estimée à 2,5 t/ha, soit 23% du carbone total stocké dans les arbres. À 145 ans, la biomasse racinaire en carbone passe à 25,5 t/ha, soit 11% du carbone total.

De son côté, l'Inventaire Forestier National (IFN) a évalué le stockage du carbone dans les écosystèmes forestiers en France métropolitaine [Colin and Derrière, 2005]. D'après la figure 2.11, le carbone contenu dans la biomasse est réparti entre quatre compartiments : le tronc et les branches (640 MtC) ; les racines (140 MtC) ; le feuillage (40 MtC) ; les ligneux bas, la végétation non ligneuse et le bois mort sur pied ou au sol (40 MtC). On en déduit que 17% du carbone stocké dans les arbres est contenu dans le compartiment racinaire. Pour le sol, les stocks se divisent entre deux compartiments : l'humus (120 MtC) et les horizons minéraux [entre 0 et 30 cm de profondeur] (1 020 MtC).

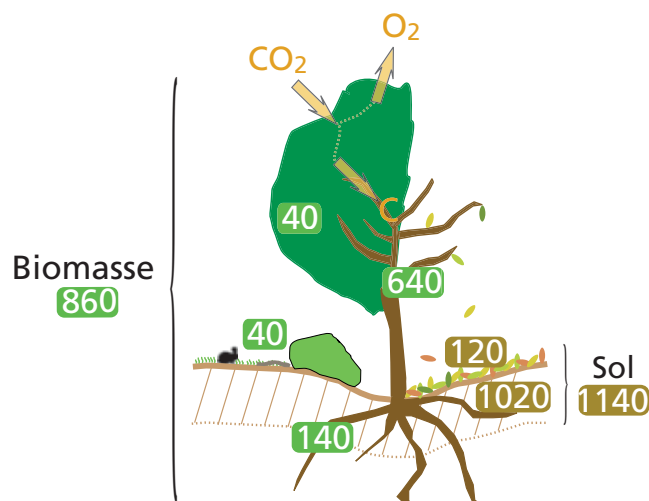


FIGURE 2.11 – Stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers en France métropolitaine (en MtC) (d'après Colin and Derrière [2005]).

Enfin, en 2015, Addo-Danso et al. [2015] ont conduit une revue de littérature dans laquelle ils ont analysé et comparé l'efficacité de plusieurs techniques dans l'estimation de biomasse racinaire. Cette comparaison se basait sur plusieurs critères qui incluent le coût, les besoins en main-d'œuvre, le temps investi et la précision des résultats. Les méthodes comparées varient entre des techniques d'excavation destructives et d'autres non-destructives comme le GPR.

2.4 Comparaison des différentes techniques d'étude du système racinaire

La localisation des systèmes racinaires et l'estimation de leur distribution spatiale est un grand défi et une condition nécessaire pour plusieurs pratiques, allant de la préservation de la santé des arbres à l'évaluation de la sécurité dans les zones urbaines. Il existe plusieurs méthodes pour étudier les racines qui peuvent être divisées en techniques destructives ou non-destructives.

2.4.1 Techniques destructives

Les méthodes destructives permettent d'étudier les systèmes racinaires au moment de l'extraction. Par conséquent, elles ont une valeur limitée pour étudier les processus de développement racinaire. De plus, ces techniques sont non seulement destructrices pour le système racinaire lui-même et le sol environnant, mais sont également coûteuses, longues et laborieuses. Compte tenu de la variabilité de l'architecture racinaire, plusieurs échantillons répliqués sont nécessaires pour évaluer avec précision les paramètres des racines, mais cette pratique détruit le système racinaire et expose l'arbre aux maladies et infections qui peuvent entraîner sa mort [Smit et al., 2013]. Cependant, ces techniques sont encore largement utilisées, car elles fournissent des résultats quantitatifs assez fiables.

Dans ce manuscrit, nous nous limitons au rappel du principe de fonctionnement de deux principales méthodes destructives : les noyaux de croissance et la méthode du monolithe.

Les noyaux de croissance

La technique des noyaux de croissance (*Ingrowth core*), appelée aussi "les sacs de croissance", est souvent utilisée pour quantifier la production de racines fines et estimer le taux de croissance au cours d'une période donnée. Le principe de cette technique est de remplacer un volume de sol (tel quel) par le même volume de sol sans racines, enfermé dans un sac en filet, qui est ré-échantillonné après une période déterminée (figure 2.12).

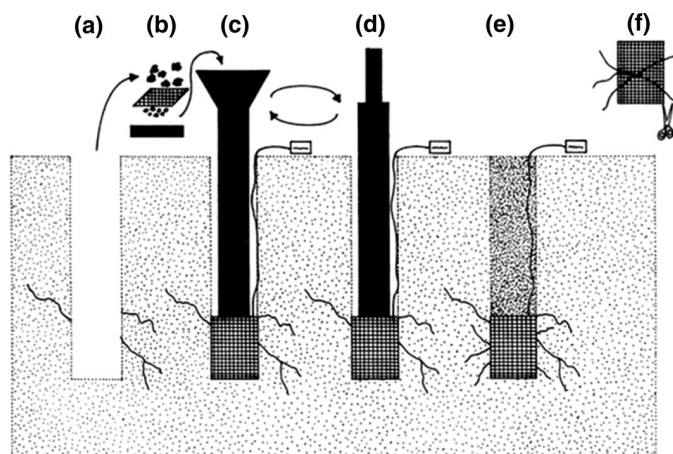


FIGURE 2.12 – Procédure d'installation des sacs en filet pour la technique du noyau de croissance des racines [Smit et al., 2013]. (a) un noyau de terre est enlevé; (b) le sol est tamisé pour enlever les racines; (c) un sac en filet est placé dans le trou, qui est rempli de sol tamisé; (d) le sol est tassé à sa densité apparente d'origine moyennant un pilon; (e) le sac en filet est laissé en place pendant une période de temps déterminée avant d'être récupéré; et (f) les racines non ligneuses sont parées.

Les principaux avantages de cette méthode se résument dans sa simplicité et son faible coût. La technique permet également d'évaluer le temps qu'il faut aux racines pour se développer dans un sol particulier. Cependant, cela peut conduire à une mauvaise interprétation, car la structure du sol est modifiée lorsque les sacs en filet sont introduits dans la fosse [Smit et al., 2013], ce qui peut affecter les taux de croissance des racines. De plus, comme les racines sont endommagées par le carottage initial, leur développement dans les échantillons sans racines peut être non-naturel.

La méthode du monolithe

La méthode monolithique nécessite d'enlever et de laver de gros blocs de terre afin de séparer les racines du sol. Dans cette technique, les racines sont lavées sans les déplacer de leur position d'origine. Cela est possible grâce à l'utilisation de panneaux spéciaux recouverts de pointes, et qui sont enfoncés dans le sol pour préserver l'architecture racinaire au moment de l'emport du sol (figure 2.13).

Cette technique fournit des informations utiles, car elle permet d'avoir une vue générale de l'architecture du système racinaire [Smit et al., 2013]. D'autre part, la collecte des échantillons nécessite une grande habileté afin de ne pas déplacer les racines. En outre, le processus de lavage peut introduire des biais, car des pertes importantes de racines peuvent se produire. Enfin, cette méthode est souvent non reproductible, car le trou sera rempli d'un nouveau sol qui pourrait conduire les racines à se développer différemment, affectant ainsi les résultats d'une deuxième inspection.

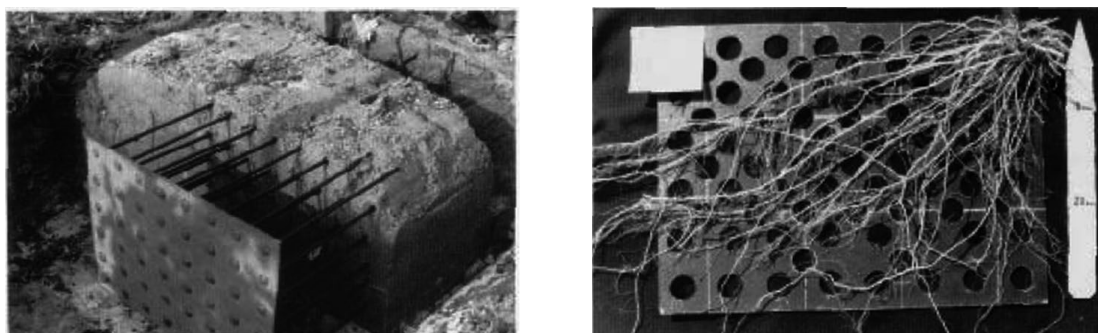


FIGURE 2.13 – Panneau métallique utilisé pour l'excavation monolithique des échantillons sol-racines (à gauche) et des racines après extraction et lavage du sol (à droite). (d'après Leskovar et al. [1994])

2.4.2 Techniques non-destructives

Les méthodes non-destructives sont reconnues comme étant efficaces pour ausculter différents milieux sans les perturber ni les endommager. Ces techniques sont facilement reproductibles, ce qui permet, dans le cas de l'étude des systèmes racinaires, de réaliser un suivi à long terme de l'évolution spatio-temporelle des racines d'arbres.

Les principales techniques non-destructives appliquées pour étudier les systèmes racinaires sont les suivantes : la méthode des minirhizotrons, la tomographie par résistivité électrique, la détection acoustique, la tomographie par rayons X, le GPR. Nous rappellerons brièvement ici, le principe de fonctionnement des quatre premières techniques. Le détail de l'application du GPR à l'étude des racines suivra dans la section suivante (2.5).

La méthode des minirhizotrons

L'une des premières méthodes non-destructives utilisées pour l'observation du système racinaire des arbres a été de mettre des plaques de verre dans le sol, afin qu'il soit possible d'observer le développement et la croissance des racines contre elles. Cette méthode a évolué vers le minirhizotron, à savoir une chambre souterraine équipée de parois en verre.

Cette technique offre un accès reproductible permettant une meilleure compréhension des processus souterrains tels qu'ils sont dans la nature. Ces instruments sont constitués de petits tubes en plastique (environ 5 cm de diamètre et 2 à 3 m de long), qui peuvent être enfoncés dans le sol sous différents angles [Rewald and Ephrath, 2013]), comme illustré dans la figure 2.14. Une lumière à fibre optique et une caméra sont ensuite introduites dans le tube afin d'observer l'architecture racinaire, parfois en combinaison avec un logiciel de traitement d'image dédié.

Néanmoins, cette technique souffre d'un certain nombre de limitations. D'abord, son installation dans des sols contenant des cailloux est difficile voire impossible. Une autre limitation vient du fait que les minirhizotrons ne sont pas totalement non-invasifs, car ils peuvent créer une interface sol-racine altérée qui peut, dans certains cas, affecter la croissance des racines.

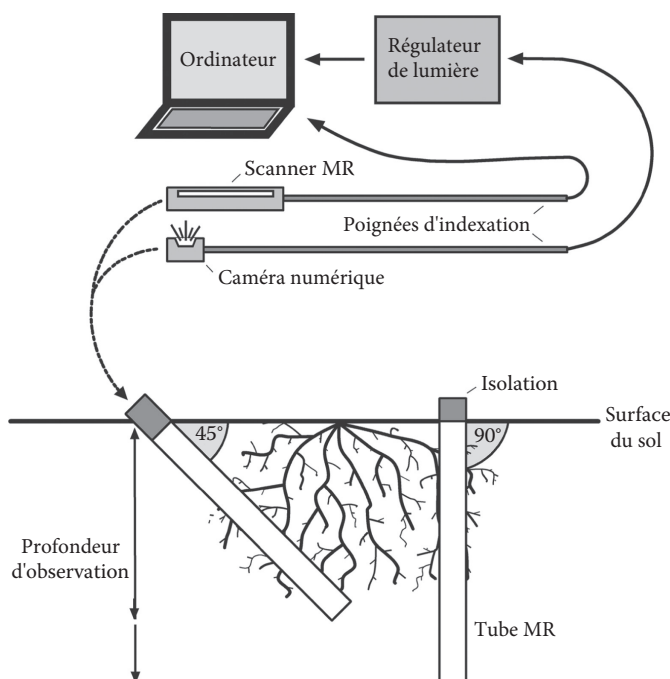


FIGURE 2.14 – Configuration des minirhizotrons à la fois en angle (45°) et en position verticale (90°); l'isolation thermique et les profondeurs d'observation sont indiquées. Les images sont capturées par des systèmes de MR basés sur un appareil photo numérique ou un scanner connectés à un ordinateur portable. Les poignées d'indexation permettent un positionnement exact des appareils dans le tube d'observation; l'intensité lumineuse des systèmes de caméras MR peut être réglée. (d'après Rewald and Ephrath [2013])

La tomographie par résistivité électrique

Cette technique géophysique est basée sur le calcul de la distribution souterraine de la résistivité électrique. Elle a été largement utilisée pour la caractérisation de l'hétérogénéité des sols. La résistivité électrique (ρ) est définie comme la résistance électrique à travers un corps uniforme de longueur unitaire et de section transversale unitaire. C'est la quantité inverse de la conductivité électrique et représente la capacité des matériaux à limiter le transfert de courant électrique.

Les mesures de résistivité du sol sont effectuées en appliquant des courants électriques à travers au moins deux électrodes (électrodes de courant), en lisant les différences de potentiel électrique qui en résultent sur au moins deux conducteurs séparés (électrodes de potentiel) et en calculant selon l'équation :

$$\rho = \frac{K\Delta V}{I} \quad (\Omega.m) \quad (2.2)$$

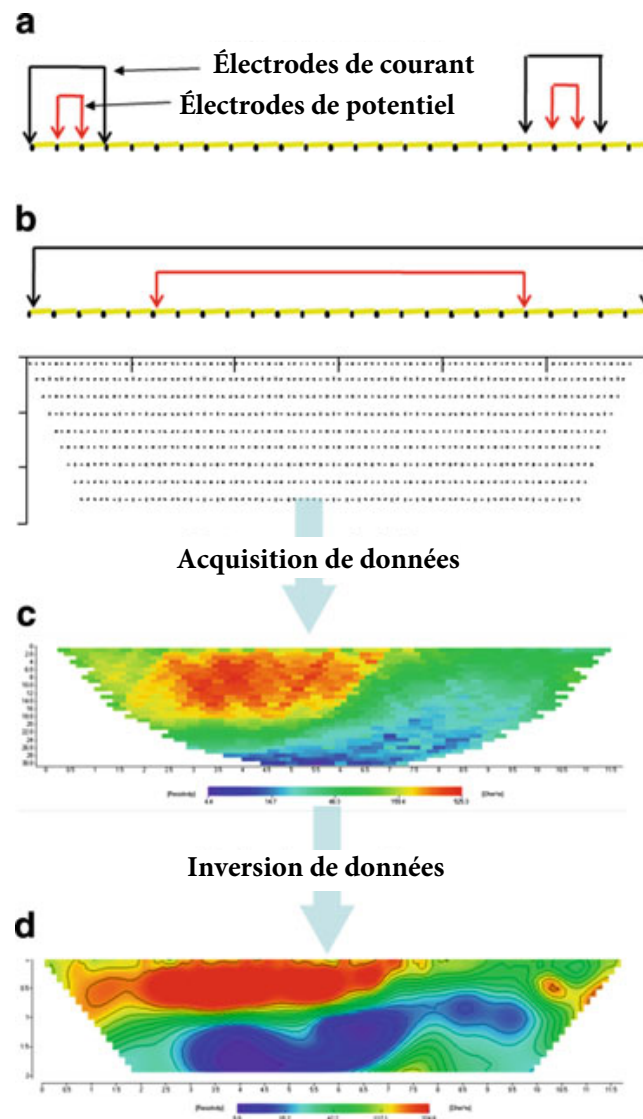


FIGURE 2.15 – Acquisition et traitement de données de tomographie par résistivité électrique; (a) un réseau d'électrodes avec des positions d'électrodes pour deux quadripôles à espacement minimum (en haut) et maximum (en bas). Les points représentent des électrodes; (b) distribution spatiale des volumes de sol auxquels des valeurs de résistivité sont attribuées. Les points représentent le centre de chaque volume; (c) distribution spatiale de la résistivité apparente du sol obtenue après l'acquisition des données; (d) Coupe 2-D de la résistivité réelle du sol obtenue après inversion des données. (d'après Amato et al. [2010])

avec ΔV la différence du potentiel électrique (en V), I le courant (en A) et K un coefficient géométrique qui dépend de la configuration des électrodes.

Comme illustré dans la figure 2.15, le relevé est effectué en mesurant la résistivité sur un seul quadripôle du réseau à la fois. Tous les espacements quadripolaires possibles le long de la ligne sont exploités pour les mesures, de l'espacement le plus bas (correspondant aux électrodes adjacentes) à l'espacement maximal (déterminé par la longueur totale du réseau). Différentes configurations se réfèrent à la position relative des électrodes de courant et de potentiel, leur nombre et leur espacement permettent d'atteindre différentes profondeurs d'investigation, de résolution et de rapport signal à bruit.

Une relation quantitative entre la résistivité électrique du sol et la biomasse des racines a été établie par Amato et al. [2008]. Cependant, dans le cas de faibles densités de biomasse racinaire, la réponse électrique des racines reste indiscernable du bruit.

Au delà de son faible coût, cette méthode présente l'avantage d'être totalement non-destructive car elle ne perturbe ni la structure racinaire ni le fonctionnement du sol. Cependant, cette technique d'investigation peut être influencée par plusieurs facteurs qui pourraient potentiellement dégrader la qualité des mesures et rendre l'interprétation des résultats difficile. En effet, des erreurs systématiques peuvent résulter d'un mauvais contact sol-électrodes. De plus, les mesures sur le terrain doivent être couplées aux études en laboratoire afin de calibrer la résistivité vis-à-vis des différentes conditions du sol.

La détection acoustique

La détection acoustique du bois est largement utilisée pour étudier les différentes composantes de l'arbre. La détection acoustique des racines se base sur la différence de vitesse de propagation dans le bois et le sol. En fait, la vitesse du signal acoustique dans le sol est située entre 250 et 400 m/s , selon le type et l'humidité du sol, tandis que la vitesse dans le bois est située entre 2000 et 4000 m/s selon sa teneur en eau [Buza and Divós, 2016].

Le système de détection acoustique des racines est présenté sur la figure 2.16. La sonde émettrice doit être placée sur le tronc au niveau du sol (collet de l'arbre). Le récepteur est sous forme d'une longue pointe métallique (de 30 cm ou plus) couplée au sol. Lors de l'acquisition, l'émetteur envoie un signal très court, qui est ensuite réfléchi et capté par le récepteur. La présence de racines diminue considérablement le temps de trajet, ce qui permet de les localiser. Un exemple de reconstruction du système racinaire d'arbre par cette technique est montré sur la figure 2.17.

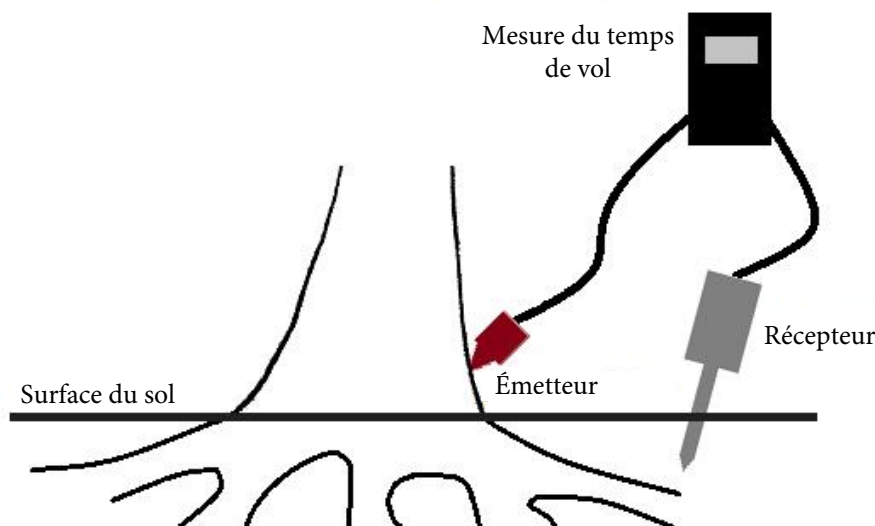


FIGURE 2.16 – Système de détection acoustique des racines (modifié de Buza and Divós [2016]).

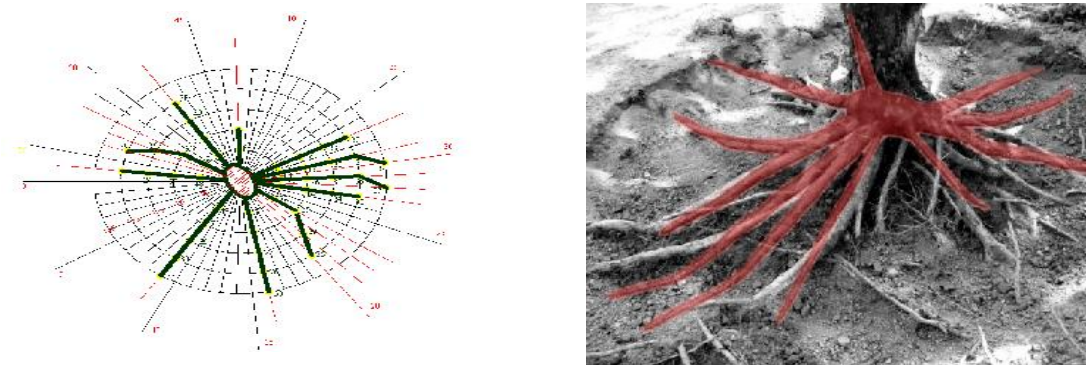


FIGURE 2.17 – Reconstruction du système racinaire par la technique de détection acoustique (à gauche) et le résultat de l'excavation (à droite). (d'après [Buza and Divós \[2016\]](#))

Selon [Buza and Divós \[2016\]](#), cette technique permet d'identifier les racines d'un diamètre supérieur à 4 cm, situées à une profondeur maximale de 50 cm. De plus, pour pouvoir distinguer la présence de deux racines adjacentes par cette méthode, celles-ci doivent être espacées d'au moins 20 cm. Ces performances peuvent être vues comme des limitations, étant donné que les petites racines ou les plus profondes ne peuvent pas être détectées. En plus, cette technique est fortement perturbée par la présence d'objets dans le sol comme les cailloux, ce qui rend difficile de reconstruire l'architecture du système racinaire.

La tomographie par rayons X

La tomographie par rayons X est une technique non-destructive et non-invasive qui peut être utilisée pour visualiser la structure interne des objets (en 2-D et 3-D). Il a été démontré à plusieurs reprises que la tomographie par rayons X est une technique efficace pour l'imagerie et l'étude des systèmes racinaires [[Gregory et al., 2003](#); [Tracy et al., 2010](#)]. Cette technique utilise des rayons X pour obtenir des images transversales d'un objet, qui contiennent des informations concernant l'atténuation des rayons X en fonction de la densité du milieu sous test. Ces images sont ensuite utilisées pour reconstruire une visualisation tridimensionnelle du volume étudié.

Lors de l'acquisition, les rayons X sont produits dans un tube qui contient une anode et une cathode. Lorsqu'une haute tension est appliquée à travers ces électrodes, les électrons accélérés produisent des rayons X lorsqu'ils frappent l'anode. Lorsque les faisceaux de rayons X traversent un échantillon, l'objet lui-même devient une source secondaire de rayons X et d'électrons. Une partie du faisceau incident primaire est donc absorbée ou diffusée. Cette réduction de l'intensité des rayons X lorsqu'ils traversent l'objet étudié est appelée atténuation. Le faisceau est projeté sur le détecteur, qui mesure le changement d'intensité énergétique.

Cependant, une principale limitation de la tomographie par rayons X réside dans le fait que le coefficient d'atténuation est généralement similaire pour les racines et les autres matières organiques du sol. Ce problème est encore exacerbé si la teneur en eau du sol est élevée. Au-delà des limitations techniques, cette méthode reste parmi les plus coûteuses.

En conclusion, toutes les méthodes non-destructives présentées ont prouvé leur viabilité dans l'évaluation des systèmes racinaires des arbres. Cependant, leur emploi peut être gênant, car l'équipement requis est souvent difficile à utiliser. De plus, l'application de ces méthodes est souvent très coûteuse. D'un autre côté, la technique du [GPR](#) attire de plus en plus l'attention des chercheurs d'aujourd'hui vu sa grande polyvalence, la rapidité de sa collecte de données et de la fourniture de résultats fiables à des coûts relativement limités. Les avantages et les limites des techniques non-destructives susmentionnées pour l'imagerie des systèmes racinaires des arbres sont résumés dans le tableau [2.1](#).

TABLEAU 2.1 – Tableau comparatif des méthodes non-destructives pour l'étude des systèmes racinaires.

Principe	Méthode	Caractéristiques	Avantages	Limitations
Optique	Minirhizotrons	Non-destructive Légèrement invasive	Imagerie de haute résolution	Modification de l'hydrologie du sol Seules de petites parties du système racinaire peut être observées Coût d'installation Difficulté de s'installer dans des environnements urbains
Électrique	TRE	Non-destructive Non-invasive	Facilité de collecte des données Mesures reproductibles dans le temps Profondeur de détection	Erreurs systématiques dues à un mauvais contact sol-électrodes Temps de mesure longs Phase d'étalonnage en laboratoire nécessaire Non-unicité de la solution dans la phase d'inversion
Acoustique	Détection acoustique	Non-destructive Légèrement invasive	Détection réussie des racines grossières	Les petites racines (diamètre < 4 cm) ne sont pas détectables Profondeur de détection superficielle (< 50 cm) Forte sensibilité à l'humidité du sol
Électromagnétique	Tomographie par rayons X	Non-destructive Non-invasive	Imagerie de haute résolution Détection de racines fines	Difficulté à distinguer entre les racines et les autres matériaux Traitement d'images complexes
	GPR	Non-destructive Non-invasive	Totalement non-invasive Facile à utiliser Mesures reproductibles dans le temps Différentes fréquences pour différents objectifs	Les petites racines (diamètre < 0,5 cm) ne sont pas détectables Difficulté de distinguer les racines du clutter

2.5 Utilisation du GPR pour l'imagerie des racines et l'estimation de biomasse

Bien que le GPR ait été largement utilisé pour caractériser les profils de sol, les racines ont souvent été considérées comme une source de bruit indésirable qui complique généralement l'interprétation des résultats. Cependant, au cours des deux dernières décennies, le GPR a été de plus en plus utilisé pour la détection et la cartographie des racines ligneuses des arbres. Cette technique géophysique est complètement non-invasive car elle ne perturbe pas les sols ni ne nuit aux arbres examinés ou à l'environnement. Pour ces raisons, des mesures répétées des systèmes racinaires sont possibles, permettant ainsi d'étudier les processus de développement des racines. Contrairement aux autres méthodes non-destructives, le GPR est particulièrement attrayant car il utilise un équipement standard qui est très portable, rapide et peut être utilisé pour scanner plusieurs kilomètres de transects par jour.

La première application du GPR qui concerne la cartographie des systèmes racinaires des arbres remonte à 1999 [Hruska et al., 1999]. Dans cette étude, un système GPR avec une fréquence centrale de 450 MHz a été utilisé pour cartographier les racines d'un chêne de 50 ans. L'antenne a pu détecter des racines de plus de 3 cm à une profondeur d'environ 2 m. Après le traitement des données, le système racinaire du grand chêne a été analysé en détail pour enfin aboutir à une architecture 3-D de l'architecture racinaire (figure 2.18). De plus, le système racinaire a été excavé et photographié, et les diamètres des racines détectées correspondaient aux diamètres mesurés des racines excavées avec une erreur comprise entre 1 et 2 cm. Les erreurs au niveau de la longueur des racines étaient de l'ordre de 20 à 30 cm. Cependant, le résultat de cette étude a été critiqué plusieurs années plus tard par Guo et al. [2013], car les reconstructions 3-D du système racinaire ont été redessinées manuellement sur la base des radargrammes GPR, alors qu'aucune information spécifique n'a été fournie sur la façon dont cela avait été fait.

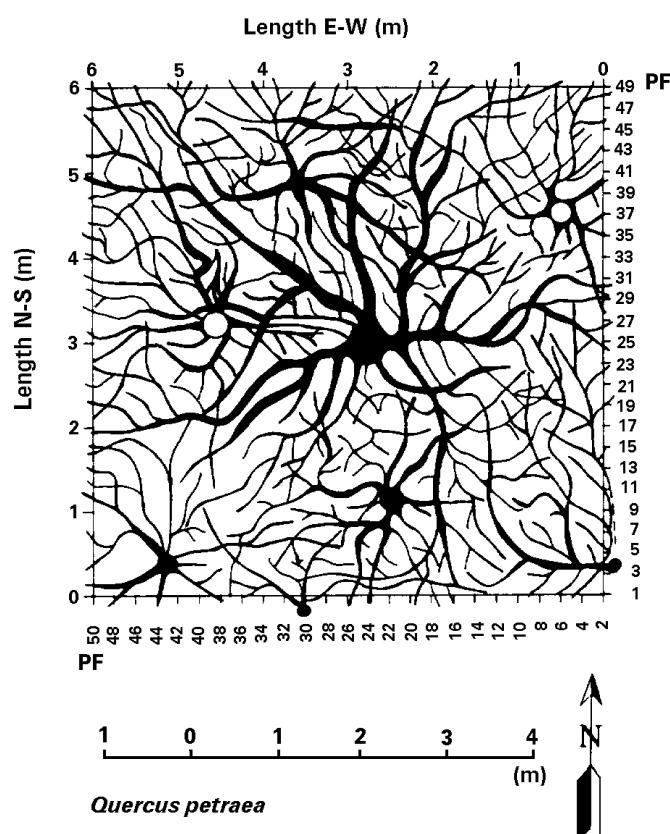


FIGURE 2.18 – Reconstruction dessinée à la main d'un système racinaire d'arbre basée sur l'analyse des données GPR [Hruska et al., 1999].

Quelques années plus tard, [Zenone et al. \[2008\]](#) a testé la faisabilité de l'utilisation du [GPR](#) pour la reconstruction de l'architecture tridimensionnelle du système racinaire. Dans cette étude, un système [GPR](#) avec une fréquence centrale de 1 500 MHz a été utilisé pour scanner les systèmes racinaires *in situ*. Ensuite, les systèmes racinaires étudiés ont été entièrement excavés à la pelle à air (*air-spade*) et arrachés par un excavateur. Un système de mesure laser a été utilisé pour scanner l'ensemble du système racinaire excavé et son architecture tridimensionnelle a été reconstruite. Le résultat 3-D des scans [GPR](#) après migration a été comparé au nuage de points laser (voir figure 2.19). Cependant, aucune correspondance réelle entre les résultats des données [GPR](#) et le système racinaire excavé n'a été trouvée dans cette étude. Bien que les auteurs de l'étude aient déclaré que l'architecture du système racinaire pourrait avoir été modifiée lors de l'excavation (ce qui pourrait expliquer en partie l'inadéquation entre les résultats du [GPR](#) et ceux de l'excavation), l'utilisation du [GPR](#) pour la reconstruction de l'architecture racinaire en 3-D reste encore un sujet de discussion et devrait être étudiée davantage.

Dans d'autres études, l'utilisation des fréquences élevées avec le [GPR](#) a permis d'atteindre des résolutions parfois meilleures que 1 cm. Le tableau 2.2 résume les profondeurs et les résolutions atteintes pour la détection des racines ligneuses par le [GPR](#) à différentes fréquences centrales d'antennes sur la base des travaux publiés. La plage de la taille minimale des racines détectables varie de 1 à 4 cm, de 1 à 2,5 cm et de 0,25 à 0,5 cm pour des fréquences centrales comprises entre 400 et 500 MHz, 800 et 1 000 MHz et 1 500 et 2 000 MHz, respectivement.

La taille minimale des racines détectables est toujours un sujet de discussion. En fait, des tests effectués dans des conditions contrôlées ont confirmé qu'il était possible de détecter des racines à faible diamètre (de l'ordre de 0,5 cm) [[Butnor et al., 2001](#)], tandis que des tests effectués sur le terrain ont démontré que seules des racines grossières d'un diamètre supérieur à 5 cm ont pu être identifiées [[Ow and Sim, 2012](#)]. En règle générale, les basses fréquences (< 400 MHz) ont une pénétration profonde, mais ne peuvent résoudre que des objets volumineux. En revanche, les moyennes (400 – 1 000 MHz) et hautes fréquences (> 1 000 MHz) ne peuvent pas pénétrer aussi profondément, mais sont capables de résoudre des objets plus petits. Par conséquent, il s'agit de trouver un compromis entre résolution et pénétration. Toutefois, la nature des antennes [ULB](#) (comme celle utilisée pour réaliser les mesures au laboratoire de cette thèse) permet de détecter toute une gamme de tailles et de profondeurs d'objets.

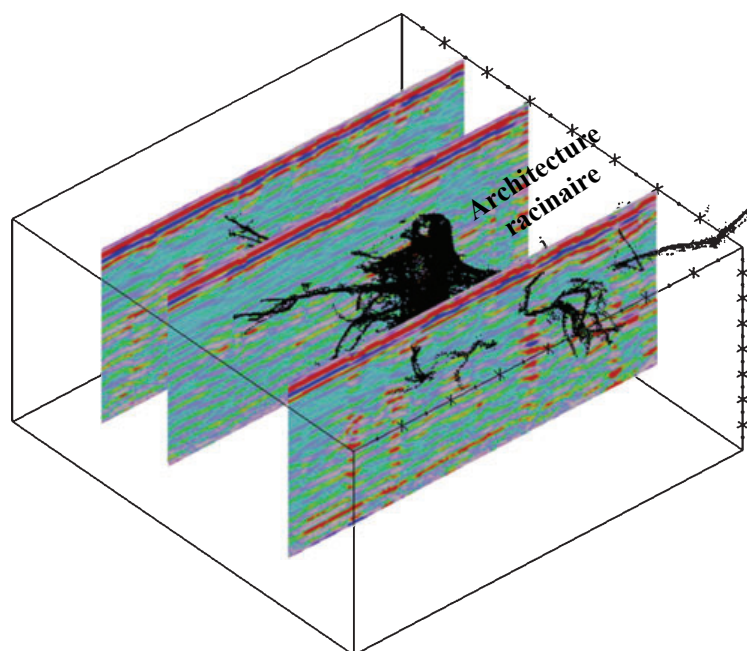


FIGURE 2.19 – Comparaison entre les données GPR et la reconstruction de l'architecture racinaire par le système laser après excavation (d'après [[Zenone et al., 2008](#)]).

TABEAU 2.2 – Les profondeurs et résolutions des systèmes GPR à différentes fréquences utilisées pour la détection des racines dans divers types de sols.

Fréquence (MHz)	Texture du sol		Conditions du site	Espèce d'arbre	Profondeur maximale (m)	Résolution (cm)*	Référence
	Sable(%)	Argile et Limon (%)					
400	65	35	Plantation	Pin (<i>Pinus taeda</i>)	1,00	3,7	Butnor et al. [2001]
400	70	30	Plantation	Pin (<i>Pinus taeda</i>)	1,30	-	Butnor et al. [2001]
450	30 ~ 60	40 ~ 70	Plantation	Chêne (<i>Quercus petraea</i>)	2,20	3,0 ~ 4,0	Hruska et al. [1999]
450	<50	>50	Cadre urbain avec trottoir et pelouse en surface	Érable champêtre (<i>Acer campestre</i>)	2,00	2,0 ~ 3,0	Cermak et al. [2000]
450	<50	>50	Cadre urbain avec pelouse en surface	Pin noir (<i>Pinus nigra</i>)	2,50	2,0	Stokes et al. [2002]
500	100	0	Contrôlé dans un champ	Eucalyptus	-	1,0	Barton and Montagu [2004]
800	100	0	Contrôlé dans un champ	Eucalyptus	1,55	<1,0	Barton and Montagu [2004]
900	93	7	Contrôlé dans un champ	Pêcher (<i>Prunus persica</i>)	1,14	2,5	Cox et al. [2005]
900	100	0	Contrôlé dans un champ	Cryptomérida du Japon	0,80	1,9	Hirano et al. [2009]
1000	100	0	Contrôlé dans un champ	Eucalyptus	1,55	<1,0	Barton and Montagu [2004]
1500	90	10	Plantation	Peuplier (<i>Populus deltoides</i>)	0,45	0,6	Butnor et al. [2001]
1500	85 ~ 92	8 ~ 15	Plantation	Pin (<i>Pinus taeda</i>)	0,50	0,5	Butnor et al. [2001]
1500	65	35	Plantation	Pin (<i>Pinus taeda</i>)	0,60	-	Butnor et al. [2001]
1500	>70	<30	Plantation	Pin (<i>Pinus taeda</i>)	0,50	0,5	Butnor et al. [2003]
1500	>90	<10	Plantation	Chêne (<i>Quercus sp.</i>)	0,60	0,5	Stover et al. [2007]
2000	95	5	Contrôlé dans un champ	Orme de Sibérie (<i>Ulmus pumila</i>)	0,80	0,5	Cui et al. [2011]

* Désigne la taille minimale d'une racine détectée

Récemment, la recherche s'est concentrée sur l'utilisation du GPR comme outil approprié pour une utilisation sur des arbres remarquables, ou des arbres dans des situations où l'excavation n'est pas possible, comme la croissance près des routes, des bâtiments ou sur des pentes instables [Stokes et al., 2002]. Les données GPR étaient suffisantes pour localiser de façon fiable les racines sous les chaussées et de fournir un nombre de racines raisonnablement précis dans le sol compacté sous le béton et l'asphalte [Cermak et al., 2000]. Ceci est possible grâce à la différence de teneur en eau entre les racines vivantes et le sol, qui peut assurer le contraste de permittivité nécessaire et ainsi permettre la détection des racines par GPR.

Les deux méthodologies qui sont largement utilisées pour effectuer les acquisitions GPR autour d'un arbre sont montrées sur la figure 2.20. Même si les acquisitions parallèles sont préférables pour les profils GPR, les résultats peuvent aussi être obtenus avec des transects circulaires (créés en faisant tourner le GPR autour de l'arbre, en gardant une distance radiale constante). Cette méthode est souvent utilisée pour assurer un balayage quasi-perpendiculaire des systèmes racinaires. La difficulté majeure dans cette configuration est due à la rugosité du sol, car il est difficile de pousser un système radar en cercles en présence des pierres.

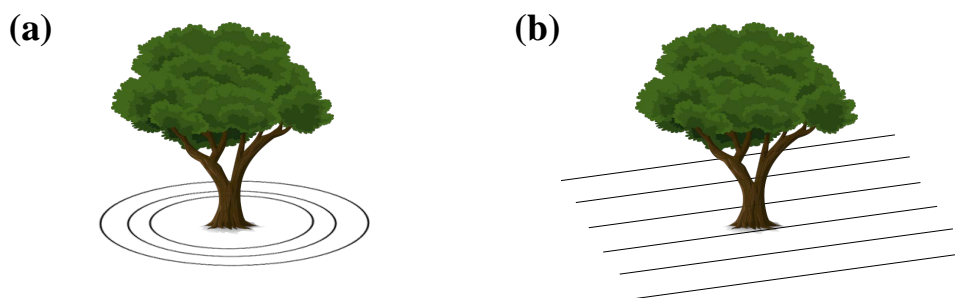


FIGURE 2.20 – Modes de mesure du système racinaire des arbres par GPR. (a) acquisitions circulaires; (b) lignes d'acquisition parallèles.

En ce qui concerne le traitement et l'analyse des données GPR, des techniques de traitement du signal appropriées sont nécessaires pour fournir des images facilement interprétables aux opérateurs et aux décideurs. La plupart des techniques appliquées aujourd'hui dans le GPR proviennent de la théorie sismique [Benedetto et al., 2017]. En revanche, il n'est pas possible d'établir une méthodologie unique ou standard, car cela dépend du but de l'étude, des caractéristiques du radar utilisé et des conditions du milieu étudié. En outre, l'analyse des données GPR est une tâche difficile car l'interprétation des données est généralement non intuitive. Une expertise est donc nécessaire.

Outre la détection des racines, un sujet qui intéresse les chercheurs d'aujourd'hui est la quantification de la biomasse des racines des arbres. Comme expliqué dans la section 2.2.3, l'estimation de la biomasse racinaire des arbres est essentielle pour : 1) évaluer l'état de santé de l'arbre, 2) comprendre le stockage du carbone dans l'écosystème forestier; et 3) évaluer la stabilité de l'arbre lui-même et la stabilité du sol (étant donné que les arbres sont utilisés pour le renforcement des pentes). Le GPR s'est avéré efficace dans l'estimation de la biomasse racinaire à travers le traitement et l'analyse des images produites [Guo et al., 2013]. Plusieurs études ont été menées dans des conditions de terrain et en laboratoire pour évaluer la biomasse racinaire par GPR. Ainsi, des corrélations entre les caractéristiques des signaux GPR et la biomasse des racines ont été obtenues. La caractéristique la plus souvent corrélée à la biomasse est la surface de l'amplitude de la réflexion maximale issue des racines (cette caractéristique sera illustrée dans la sous-section 3.2.2 du chapitre 3) [Butnor et al., 2001; Cui et al., 2013]. De leur côté, suite à un processus de traitement d'images contenant les réflexions causées par les racines, Stover et al. [2007] et Zhu et al. [2014] ont proposé d'autres relations entre la biomasse racinaire et le nombre de pixels dans une plage de seuil défini.

Parallèlement, l'évaluation de la densité racinaire des arbres dans le sol par GPR s'est révélée efficace pour évaluer les conditions du système racinaire. Les variations dans le temps de la densité racinaire, obtenues en répétant les tests GPR à intervalles appropriés, pourraient aider à évaluer la santé du système racinaire. En fait, des réductions brusques de la densité racinaire pourraient être dues à l'apparition de maladies ou d'attaques fongiques. Ainsi, reconnaître le problème à un stade précoce pourrait permettre l'application de mesures correctives appropriées. Ce qui permettra de sauver l'arbre sous test et d'empêcher l'infection de se propager aux arbres voisins. Parmi les formules proposées pour évaluer la densité des racines à base des données GPR, on trouve celle de Lantini et al. [2019] :

$$d = \frac{\sum_{k=1}^N L_k}{V} \quad (2.3)$$

où d désigne la densité (en m/m^3), L_k la longueur de la $k^{ème}$ racine, et n le nombre de racines contenues dans le volume V .

D'autre part, il faut noter que les antennes GPR classiques placées au niveau de la surface du sol sont inadéquates pour évaluer les racines verticales, comme le pivot de l'arbre. Des méthodes pour quantifier les racines verticales avec un radar de forage (*borehole*) et une tomographie du temps de parcours ont été développées [Wänstedt et al., 2000]. Le principe de fonctionnement de ces méthodes est illustré par la figure 2.21. Le GPR de forage utilise une antenne spécialement conçue et dimensionnée pour être abaissée dans des trous de forage (~ 5 cm de diamètre) dans le sol. En mode réflexion, l'émetteur Tx et le récepteur Rx sont descendus dans le même forage et une impulsion EM est propagée (figure 2.21a). Une partie de l'énergie est réfléchiée vers le récep-

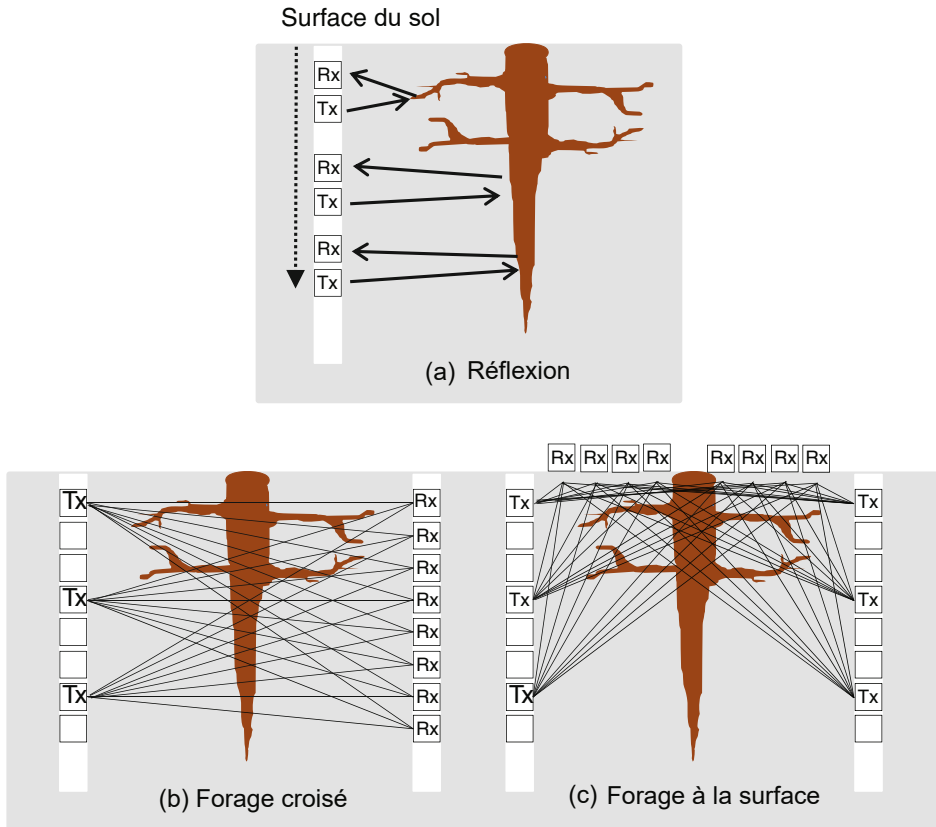


FIGURE 2.21 – En mode réflexion (a), une antenne bipolaire propage une onde EM qui se réfléchit sur les surfaces radiculaires et est détectée par le récepteur intégré. En mode transmission (b) et (c), une onde EM se propage dans une direction et son temps d'arrivée est détecté par un récepteur dans un forage adjacent (forage croisé) ou à la surface du sol (forage à surface) [Butnor et al., 2012].

teur d'une manière similaire au **GPR** de surface conventionnel, créant ainsi un scan vertical. Les données sont collectées en mode transmission en séparant les antennes Tx et Rx et en les plaçant dans des galeries opposées pour créer une configuration de forage croisé (figure 2.21b) ou en les plaçant à la surface du sol (figure 2.21c). En variant la profondeur ou l'emplacement des antennes à la surface du sol, une variété de trajets d'ondes peuvent être créés.

Cependant, l'utilisation du radar de forage pour étudier les racines des arbres n'est pas encore très développée et n'a pas été largement adoptée en raison du besoin d'équipement automatisé de collecte de données et de logiciels de traitement. De plus, dans le contexte du génie civil, ce sont souvent les racines qui se développent horizontalement en tapissant le sol qui causent des dommages aux infrastructures humaines. Ce qui explique le peu d'intérêt accordé à l'investigation des racines verticales.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une vue d'ensemble de la littérature existante dans le domaine de l'étude des racines des arbres et leur interaction avec le sol. La nature des systèmes racinaires, leur architecture et leur rapport avec l'environnement ont été couverts.

Les principales méthodes destructives pour la détection et la cartographie des racines ont été mises en évidence. Par la suite, un résumé des principales méthodes non-destructives et des résultats de recherche basés sur leur application pour l'imagerie du système racinaire a été présenté. Enfin, un récapitulatif des avantages et limitations de chacune de ces méthodes a été fourni.

En raison de sa facilité d'utilisation, de sa nature purement non-intrusive et de ses coûts relativement faibles, le **GPR** s'est révélé être un outil prometteur pour l'imagerie des racines. Les recherches récentes se sont concentrées sur la détection des racines, la reconstruction tridimensionnelle de leur architecture, et l'évaluation des paramètres clés comme le diamètre, la densité et la biomasse. Des résultats prometteurs ont été obtenus dans ce contexte; cependant, un certain nombre de facteurs limitent les performances de la détection des racines par **GPR** et affecte la précision des résultats obtenus. La hiérarchisation de ces facteurs nécessite une étude approfondie allant de la modélisation à l'évaluation de l'impact de chaque facteur. Ce qui fera l'objet du chapitre suivant.

Bibliographie

- Addo-Danso, S. D., Prescott, C. E. and Smith, A. R. [2015]. Methods for estimating root biomass and production in forest and woodland ecosystem carbon studies : A review, *Forest Ecology and Management* **359** : 332–351. [45](#)
- Amato, M., Basso, B., Celano, G., Bitella, G., Morelli, G. and Rossi, R. [2008]. In situ detection of tree root distribution and biomass by multi-electrode resistivity imaging, *Tree Physiology* **28**(10) : 1441–1448. [49](#)
- Amato, M., Rossi, R., Bitella, G. and Lovelli, S. [2010]. Multielectrode geoelectrical tomography for the quantification of plant roots, *Italian Journal of Agronomy* pp. 257–264. [viii](#), [48](#)
- Anagnostakis, S. L. [1987]. Chestnut blight : the classical problem of an introduced pathogen, *Mycologia* **79**(1) : 23–37. [40](#)
- Arboplus [2015]. <http://www.arboplus.ca/blog/developpement-durable/les-racines.html>. [36](#)
- Aukema, J. E., Leung, B., Kovacs, K., Chivers, C., Britton, K. O., Englin, J., Frankel, S. J., Haight, R. G., Holmes, T. P., Liebhold, A. M. et al. [2011]. Economic impacts of non-native forest insects in the continental United States, *PLoS one* **6**(9) : e24587. [40](#)
- Barton, C. V. and Montagu, K. D. [2004]. Detection of tree roots and determination of root diameters by ground penetrating radar under optimal conditions, *Tree Physiology* **24**(12) : 1323–1331. [54](#)
- Benedetto, A., Tosti, F., Ciampoli, L. B. and D'amico, F. [2017]. An overview of ground-penetrating radar signal processing techniques for road inspections, *Signal Processing* **132** : 201–209. [55](#)
- Brunner, I. and Godbold, D. L. [2007]. Tree roots in a changing world, *Journal of Forest Research* **12**(2) : 78–82. [36](#)
- Butnor, J. R., Barton, C., Day, F. P., Johnsen, K. H., Mucciardi, A. N., Schroeder, R. and Stover, D. B. [2012]. Using ground-penetrating radar to detect tree roots and estimate biomass, *Measuring Roots*, Springer, pp. 213–245. [ix](#), [56](#)
- Butnor, J. R., Doolittle, J., Johnsen, K. H., Samuelson, L., Stokes, T. and Kress, L. [2003]. Utility of ground-penetrating radar as a root biomass survey tool in forest systems, *Soil Science Society of America Journal* **67**(5) : 1607–1615. [54](#)
- Butnor, J. R., Doolittle, J., Kress, L., Cohen, S. and Johnsen, K. H. [2001]. Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States, *Tree Physiology* **21**(17) : 1269–1278. [53](#), [54](#), [55](#)
- Buza, Á. K. and Divós, F. [2016]. Root stability evaluation with non-destructive techniques, *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* **12**(2) : 125–134. [viii](#), [49](#), [50](#)
- Cermak, J., Hruska, J., Martinkova, M. and Prax, A. [2000]. Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetrating radar and sap flow techniques, *Plant and Soil* **219**(1-2) : 103–116. [54](#), [55](#)
- Colin, A. and Derrière, N. [2005]. La forêt française : un puits de carbone, *L'IF* **7** : 8. [viii](#), [44](#), [45](#)
- Coutts, M. [1983]. Root architecture and tree stability, in D. Atkinson, K. K. S. Bhat, C. M. P. P. A. Mason and D. K. Read (eds), *Tree Root systems and their Mycorrhizas*, Springer, pp. 171–188. [36](#), [42](#)
- Cox, K., 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. [54](#)

- Cui, X., Chen, J., Shen, J., Cao, X., Chen, X. and Zhu, X. [2011]. Modeling tree root diameter and biomass by ground-penetrating radar, *Science China Earth Sciences* **54**(5) : 711–719. [54](#)
- Cui, X., Guo, L., Chen, J., Chen, X. and Zhu, X. [2013]. Estimating tree-root biomass in different depths using ground-penetrating radar : Evidence from a controlled experiment, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **51**(6) : 3410–3423. [55](#)
- Danjon, F. and Fourcaud, T. [2009]. L'arbre et son enracinement, *Innovations Agronomiques* **6** : 17–37. [viii](#), [41](#)
- Day, S. D., Wiseman, P. E., Dickinson, S. B. and Harris, J. R. [2010]. Contemporary concepts of root system architecture of urban trees, *Arboriculture & Urban Forestry* **36**(4) : 149–159. [40](#)
- Dorval, A. D. [2015]. *Architecture Racinaire et Stabilité chez le Pin Maritime (Pinus pPnaster Ait.) au Stade Jeune*, PhD thesis, Université des Sciences et Technologies (Bordeaux 1). [36](#), [38](#)
- Drénou, C. [2006]. *Les Racines : Face Cachée des Arbres*, Forêt Privée Française. [41](#), [44](#)
- Gilman, E. F. [1988]. Predicting root spread from trunk diameter and branch spread, *Journal of Arboriculture* **14**(4) : 85–89. [40](#)
- Gregory, P. [2006]. *Plant Roots*, Wiley Online Library. [vii](#), [37](#)
- Gregory, P. J., Hutchison, D., Read, D. B., Jenneson, P. M., Gilboy, W. B. and Morton, E. J. [2003]. Non-invasive imaging of roots with high resolution X-ray micro-tomography, in J. J. Abe (ed.), *Roots : the Dynamic Interface between Plants and the Earth*, Springer, pp. 351–359. [50](#)
- Guo, L., Chen, J., Cui, X., Fan, B. and Lin, H. [2013]. Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification : a review, *Plant and Soil* **362**(1-2) : 1–23. [52](#), [55](#)
- Hansen, E. M. and Goheen, E. M. [2000]. Phellinus weirii and other native root pathogens as determinants of forest structure and process in western North America, *Annual Review of Phytopathology* **38**(1) : 515–539. [40](#), [41](#)
- Hirano, Y., Dannoura, M., Aono, K., Igarashi, T., Ishii, M., Yamase, K., Makita, N. and Kanazawa, Y. [2009]. Limiting factors in the detection of tree roots using ground-penetrating radar, *Plant and Soil* **319**(1-2) : 15. [54](#)
- Hruska, J., Čermák, J. and Šustek, S. [1999]. Mapping tree root systems with ground-penetrating radar, *Tree Physiology* **19**(2) : 125–130. [viii](#), [52](#), [54](#)
- Huet, S., Forgeard, F. and Nys, C. [2004]. Above-and belowground distribution of dry matter and carbon biomass of atlantic beech (fagus sylvatica l.) in a time sequence, *Annals of Forest Science* **61**(7) : 683–694. [44](#)
- Jackson, R. B., Canadell, J., Ehleringer, J. R., Mooney, H. A., Sala, O. E. and Schulze, E. D. [1996]. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes, *Oecologia* **108**(3) : 389–411. [38](#), [39](#)
- James, K. R., Haritos, N. and Ades, P. K. [2006]. Mechanical stability of trees under dynamic loads, *American Journal of Botany* **93**(10) : 1522–1530. [41](#)
- Lantini, L., Tosti, F., Giannakis, I., Egyir, D., Benedetto, A. and Alani, A. M. [2019]. A novel processing framework for tree root mapping and density estimation using ground penetrating radar, *10th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, The Hague*, Vol. 2019, pp. 1–6. [56](#)
- Leskovar, D. I., Cantliffe, D. J. and Stoffella, P. J. [1994]. Transplant production systems influence growth and yield of fresh-market tomatoes, *Journal of the American Society for Horticultural Science* **119**(4) : 662–668. [viii](#), [46](#)

- MacLeod, R. and Cram, W. [1996]. Forces exerted by tree roots, *Arboriculture Research and Information Note Department of the Environment, UK*. **13496** : 8. [42](#)
- McPherson, E. and Peper, P. [2000]. Costs due to conflicts between street tree root growth and hardscape, *Proceedings of the Symposium on Strategies to Reduce Infrastructure Damage by Tree Roots, UC Davis*, pp. 15–18. [43](#)
- Nobel, P. S. [2003]. *Environmental Biology of Cgaves and Cacti*, Cambridge University Press. [39](#)
- Ow, L. F. and Sim, E. K. [2012]. Detection of urban tree roots with the ground penetrating radar, *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology* **146**(sup1) : 288–297. [53](#)
- Pallardy, S. G. [2010]. *Physiology of Woody Plants*, Academic Press. [36](#), [37](#), [39](#)
- Randrup, T. B., McPherson, E. G. and Costello, L. R. [2001]. Tree root intrusion in sewer systems : review of extent and costs, *Journal of Infrastructure Systems* **7**(1) : 26–31. [43](#)
- Rewald, B. and Ephrath, J. E. [2013]. Minirhizotron techniques, in A. Eshel and T. Beeckman (eds), *Plant Roots : The Hidden Half*, 4th edn, Vol. 42, CRC Press New York, NY, pp. 1–15. [viii](#), [47](#)
- Richardson, D. M., Pyšek, P., Rejmánek, M., Barbour, M. G., Panetta, F. D. and West, C. J. [2000]. Naturalization and invasion of alien plants : concepts and definitions, *Diversity and Distributions* **6**(2) : 93–107. [40](#)
- Saint Cast, C. [2019]. *Modélisation du Développement Architectural, de l'Acclimatation au Vent Dominant et de l'Ancrage du Système Racinaire du Pin Maritime*, PhD thesis. [viii](#), [42](#)
- Santini, A., Ghelardini, L., De Pace, C., Desprez-Loustau, M.-L., Capretti, P., Chandelier, A., Cech, T., Chira, D., Diamandis, S., Gaitniekis, T. et al. [2013]. Biogeographical patterns and determinants of invasion by forest pathogens in Europe, *New Phytologist* **197**(1) : 238–250. [40](#)
- Shainsky, L. J. and Radosevich, S. R. [1992]. Mechanisms of competition between Douglas-fir and red alder seedlings, *Ecology* **73**(1) : 30–45. [40](#)
- Smit, A. L., Bengough, A. G., Engels, C., van Noordwijk, M., Pellerin, S. and van de Geijn, S. S. C. [2013]. *Root Methods : a Handbook*, Springer Science & Business Media. [viii](#), [45](#), [46](#)
- Stokes, A., Fourcaud, T., Hruska, J., Cermak, J., Nadyezhdina, N., Nadyezhdin, V., Praus, L. et al. [2002]. An evaluation of different methods to investigate root system architecture of urban trees in situ : I. ground-penetrating radar, *Journal of Arboriculture* **28**(1) : 2–10. [54](#), [55](#)
- Stokes, A. and Mattheck, C. [1996]. Variation of wood strength in tree roots, *Journal of Experimental Botany* **47**(5) : 693–699. [viii](#), [39](#)
- Stone, E. L. and Kalisz, P. J. [1991]. On the maximum extent of tree roots, *Forest Ecology and Management* **46**(1-2) : 59–102. [38](#), [40](#)
- Stover, D. B., Day, F. P., Butnor, J. R. and Drake, B. G. [2007]. Effect of elevated CO₂ on coarse-root biomass in florida scrub detected by ground-penetrating radar, *Ecology* **88**(5) : 1328–1334. [54](#), [55](#)
- Tracy, S. R., Roberts, J. A., Black, C. R., McNeill, A., Davidson, R. and Mooney, S. J. [2010]. The X-factor : visualizing undisturbed root architecture in soils using X-ray computed tomography, *Journal of Experimental Botany* **61**(2) : 311–313. [50](#)
- Trowbridge, P. J. and Bassuk, N. L. [2004]. *Trees in the Urban Landscape : Site assessment, Design, and Installation*, John Wiley & Sons. [43](#)

- Wänstedt, S., Carlsten, S. and Tirén, S. [2000]. Borehole radar measurements aid structure geological interpretations, *Journal of Applied Geophysics* **43**(2-4) : 227–237. [56](#)
- Williams, R. E. [1986]. *Armillaria Root Disease*, Vol. 78, US Department of Agriculture, Forest Service. [41](#)
- Wilson, B. F. [1964]. *Structure and Growth of Woody Roots of Acer Rubrum L*, Harvard University, Harvard Forest St. Petersham. [39](#)
- 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. [viii](#), [53](#)
- Zhu, S., Huang, C., Su, Y. and Sato, M. [2014]. 3D ground penetrating radar to detect tree roots and estimate root biomass in the field, *Remote Sensing* **6**(6) : 5754–5773. [55](#)

Chapitre 3

Facteurs limitant la détection des racines par GPR

« Tout obstacle renforce la détermination. Celui qui s'est fixé un but n'en change pas. »

Leonardo da Vinci

Sommaire

3.1 Introduction	64
3.2 Propriétés de la racine	64
3.2.1 Modèle diélectrique de racine	64
3.2.2 Impact du diamètre et de la teneur en eau sur la détectabilité des racines	69
3.3 Position géométrique de la racine	72
3.3.1 Modèle topologique de racine	72
3.3.2 Impact de l'orientation de la racine sur les données GPR	74
3.4 Propriétés du sol	78
3.4.1 Contexte	78
3.4.2 Modèles diélectriques du sol	81
3.4.2.1 Modèles indépendants de la fréquence	81
3.4.2.2 Modèles dépendants de la fréquence	82
3.4.3 Modèle géométrique du sol	87
3.4.3.1 Modèle des fractales	87
3.4.3.2 Modèle des inclusions	88
3.4.3.3 Analyse des deux modèles de sol hétérogène	89
3.5 Conclusion	90

3.1 Introduction

Durant le processus de l'imagerie du système racinaire par GPR, plusieurs facteurs limitent la détection des racines et impactent directement l'interprétabilité des données radar. Dans ce travail de thèse, nous avons identifié et classifié ces facteurs selon trois catégories principales : propriétés de la racine (diamètre et teneur en eau), position de la racine (orientation, profondeur et intervalle entre les racines) et propriétés du sol (humidité et composition). Par ailleurs, pour comprendre l'impact de chaque facteur, il est nécessaire de modéliser le plus fidèlement possible le scénario étudié, à savoir le système racinaire et le sol environnant. Le défi majeur est le manque de corrélations numériques qui peuvent relier les paramètres des racines et du sol (comme le diamètre et la teneur en eau des racines, et la composition et la teneur en eau du sol) à leurs propriétés EM (la constante diélectrique et la conductivité électrique). Par conséquent, l'estimation des propriétés EM des racines et des sols est essentielle au développement de la simulation directe du radargramme racinaire.

Dans ce chapitre, des modèles réalistes (diélectriques et topologiques) de racine sont présentés. Ensuite, l'impact de la nature du sol sur le développement des racines est introduit, suivi d'une description des modèles diélectriques du sol (dépendants et indépendants de la fréquence) ainsi que des modèles permettant de définir la distribution d'un sol hétérogène. L'ensemble de ces modèles a servi non seulement à la réalisation des simulations numériques de cette thèse, mais également à l'évaluation de l'impact des facteurs déterminants dans la détection des racines par GPR.

3.2 Propriétés de la racine

3.2.1 Modèle diélectrique de racine

Les racines possèdent des structures morphologiques complexes composées de la stèle, le cortex et l'épiderme. Cependant, à notre connaissance, aucune étude n'a traité le signal radar réfléchi par les interfaces entre les différentes parties de la structure interne des racines. Dans cette thèse, la modélisation racinaire est simplifiée en considérant les racines comme un mélange complexe de matériau cellulaire homogène, de bois, d'eau et d'air. Plus précisément, l'eau liée par l'hydrogène (H) à la paroi cellulaire de l'hydroxyle (OH) a été définie comme de l'*eau liée*. L'eau restante maintenue dans la cavité de la paroi cellulaire avec la capacité de se déplacer librement a été définie comme de l'*eau libre* (figure 3.1).

On définit le **Point de Saturation des Fibres (PSF)** comme l'étape dans le processus de séchage du bois pour laquelle sa teneur en eau est de 30%¹. Cette dernière est représentée uniquement par l'eau liée qui reste dans les parois cellulaires par absorption ; toute autre eau (eau libre) a été retirée des cavités cellulaires [Berry and Roderick, 2005]. L'ajout ou la suppression d'eau aux alentours du PSF affecte beaucoup les propriétés physiques et mécaniques du bois. Ainsi, selon les pourcentages d'eau libre et d'eau liée, la teneur en eau gravimétrique des racines -définie par l'équation (3.1)- pourrait être divisée en deux régions qui définissent chacune une composition différente de la racine comme montré sur le schéma de la figure 3.2.

$$\theta_g = \frac{m_{eau}}{m_{bois}} \times 100 \quad (\%) \quad (3.1)$$

où θ_g désigne la teneur en eau gravimétrique de la racine, m_{eau} la masse de l'eau totale et m_{bois} le poids de la racine sèche. Notons qu'avec cette définition, le pourcentage de la teneur en eau gravimétrique θ_g peut bien dépasser le taux de 100%. En pratique, la mesure de la teneur en eau gravimétrique du bois nécessite de faire sécher l'échantillon étudié au four jusqu'à obtenir une masse constante, puis de comparer la masse de l'échantillon avant (m_{humide}) et après (m_{sec}) le séchage en utilisant l'équation (3.2).

1. Ce pourcentage dépend de la température et du type de bois (espèce d'arbre) [plage de variation : [21-32%].

$$\theta_g = \frac{m_{humide} - m_{sec}}{m_{sec}} \times 100 \quad (\%) \quad (3.2)$$

Modèle de permittivité relative

La teneur en eau est directement liée la constante diélectrique des racines [Al Hagrey, 2007]. Toutefois, la corrélation entre ces deux grandeurs n'est pas identique pour les zones en dessous et au-dessus du PSF. Par conséquent, des modèles indépendants d'estimation de la constante diélectrique de la racine ont été employés pour les cas en dessous et au-dessus du PSF.

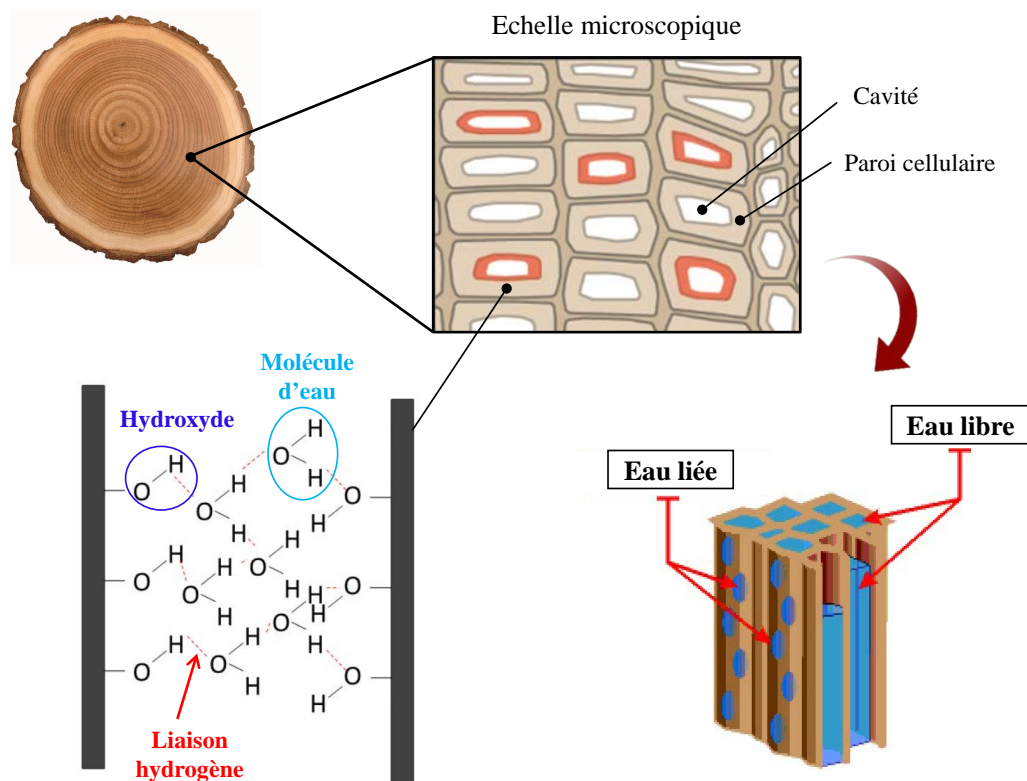


FIGURE 3.1 – Illustration des notions d'eau libre et d'eau liée dans le bois.

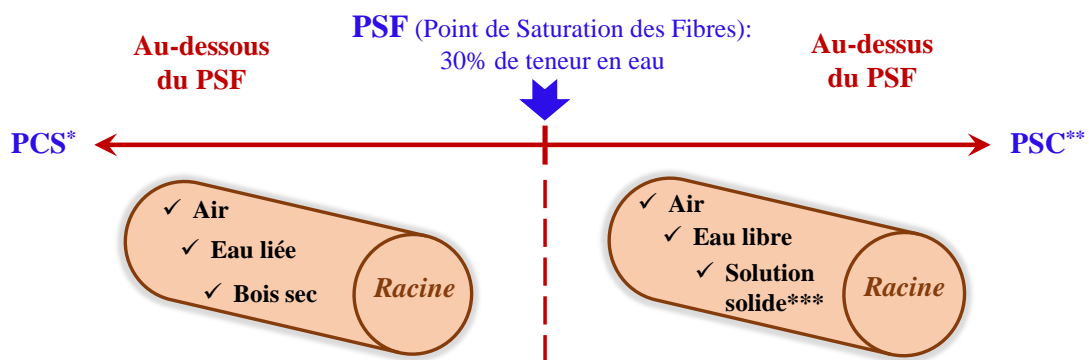


FIGURE 3.2 – Composition de la racine selon sa teneur en eau. (* : Point Complètement Sec; ** : Point de Saturation Complet; *** : combinaison de tissus cellulaires et de l'eau liée absorbée)

Pour les racines au-dessus du PSF, le modèle de Maxwell-Garnett, un modèle commun de mélange diélectrique, a été appliqué pour calculer les constantes diélectriques des racines [Paz et al., 2011]. Il s'agit d'un modèle dérivé des équations de Maxwell qui explique les interactions des champs EM avec les milieux inhomogènes. Ce modèle est basé sur la théorie du mélange qui suppose que l'inclusion d'une forme déterminée (par exemple, un plan, un cylindre ou une sphère) est distribuée dans un environnement hôte. Dans une structure racinaire, l'air est l'hôte, tandis que l'eau libre et la solution solide (mélange du bois et l'eau liée) sont des inclusions. Étant donné que l'air est un hôte électro-dynamiquement isotrope et les deux inclusions (solution solide et eau libre) sont deux ellipsoïdes aléatoirement orientés, alors l'équation du modèle de Maxwell-Garnett peut être dérivée sous la forme suivante [Koledintseva et al., 2004] :

$$\epsilon_m = \epsilon_a + \frac{\frac{1}{3} \sum_{i=0}^2 \theta_i (\epsilon_i - \epsilon_a) \sum_{j=0}^3 \frac{\epsilon_a}{\epsilon_a + N_{i,j} (\epsilon_i - \epsilon_a)}}{1 - \frac{1}{3} \sum_{i=0}^2 \theta_i (\epsilon_i - \epsilon_a) \sum_{j=0}^3 \frac{N_{i,j}}{\epsilon_a + N_{i,j} (\epsilon_i - \epsilon_a)}} \quad (3.3)$$

où ϵ_m est la constante diélectrique du mélange, ϵ_a la constante diélectrique du milieu hôte (l'air dans ce cas), ϵ_i la constante diélectrique de la $i^{\text{ème}}$ inclusion ($i = 1, 2$ dans ce cas, pour l'eau libre et la solution solide, respectivement), θ_i la fraction volumique de la $i^{\text{ème}}$ inclusion, et $N_{i,j}$ le facteur de dépolarisation de la $i^{\text{ème}}$ inclusion dans la direction du semi-axe j ($j = 1, 2, 3$ pour les semi-axes dans les directions orthogonales x, y, z).

Les valeurs considérées pour notre modèle de racine sont les suivantes : 1 pour la constante diélectrique de l'air; 81 pour celle de l'eau libre; et 10 pour celle de la solution solide (d'après Paz et al. [2011]). Dans ce travail de modélisation, les racines sont considérées comme des cylindres. Par conséquent, les valeurs des facteurs de dépolarisation de cylindres minces comme rapportées par Koledintseva et al. [2004] sont de : $N_1 = 0,5$ (axe x), $N_1 = 0$ (axe y) et $N_1 = 0,5$ (axe z). En ce qui concerne les fractions volumiques des inclusions (θ_1 pour l'eau libre et θ_2 pour la solution solide), elles ont été calculées sur la base du **Modèle de Composition Racinaire (MCR)** [Guo et al., 2013] dont les équations sont résumées dans le tableau de l'Annexe A.

Au delà de la teneur en eau, ce modèle nécessite en entrée le poids sec de la racine. La figure 3.3 montre deux modèles empiriques différents qui ont été identifiés dans la littérature décrivant la relation entre le diamètre (d) et le poids sec de la racine (m_{bois}). Dans le modèle de Guo et al. [2013], il s'agit d'une régression établie à partir d'une mesure qui a concerné 254 racines appartenant à 26 arbres de 5 espèces différentes. Les diamètres des racines étudiées varient de 0,2 à 3,9 cm (diamètre moyen $\pm 0,05$ cm). La régression du modèle de Hirano et al. [2012], quant à elle, est basée sur la mesure de 56 échantillons de racines appartenant à la même espèce d'arbre (pin). À partir de la comparaison fournie par la figure 3.3, ces deux modèles empiriques semblent être en très bon accord.

Dans notre travail, nous avons considéré le modèle de Guo et al. [2013]. Ainsi, le calcul des fractions volumiques d'eau libre et de solution solide (basé sur les relations du tableau de l'Annexe A) est donné par les équations (3.4) et (3.5), respectivement.

$$\theta_1 = m_{bois} \frac{4}{\pi d^2} (\theta_g - 0.3) = \left(0.370 + \frac{0.038}{d} \right) (\theta_g - 0.3) \quad (3.4)$$

et :

$$\theta_2 = 0.95 m_{bois} \frac{4}{\pi d^2} = 0.352 + \frac{0.036}{d} \quad (3.5)$$

En remplaçant ces éléments dans l'équation (3.3), nous obtenons l'équation finale (3.6) qui exprime la permittivité relative de la racine en fonction de sa teneur gravimétrique en eau et son diamètre.

$$\epsilon_m = 1 + \frac{27.63\theta_1 + 4.09\theta_2}{1 - 0.65\theta_1 - 0.54\theta_2} \quad (3.6)$$

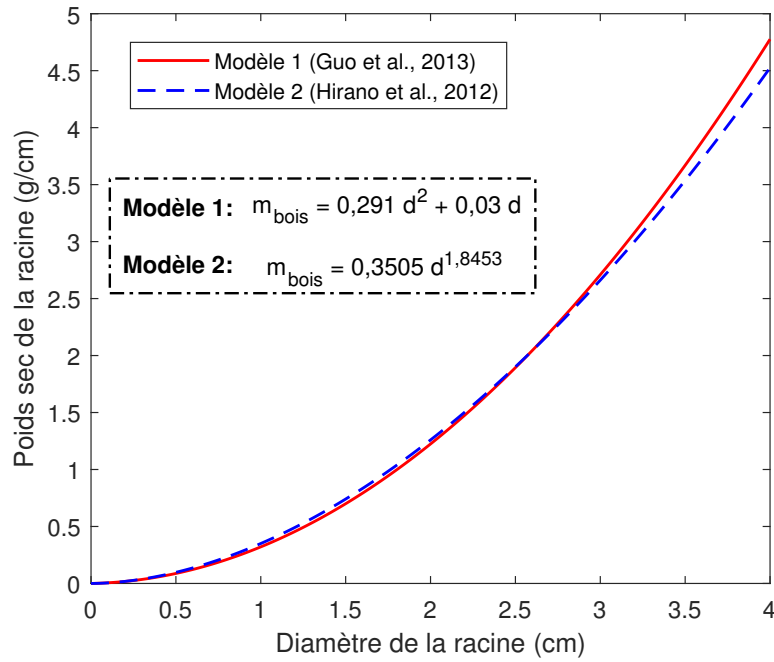


FIGURE 3.3 – Comparaison des modèles empiriques de Guo et al. [2013] et Hirano et al. [2012].

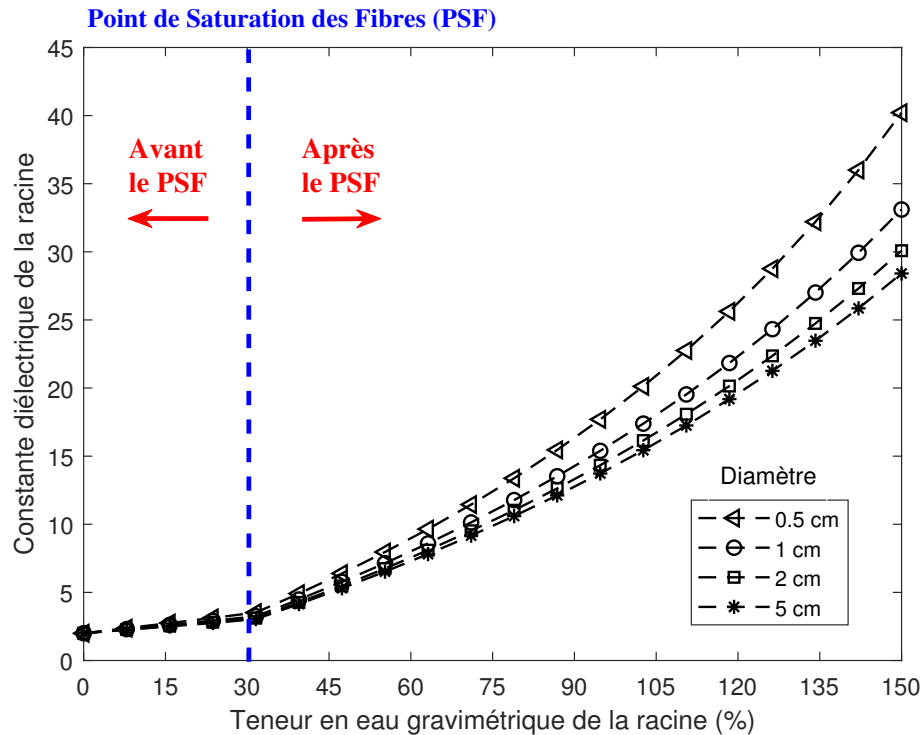


FIGURE 3.4 – Évolution de la constante diélectrique de la racine en fonction de sa teneur en eau (gravimétrique) pour différents diamètres.

La figure 3.4 montre l'évolution de la constante diélectrique de la racine en fonction de sa teneur en eau gravimétrique. Nous pouvons constater que pour des teneurs importantes, la permittivité relative de la racine décroît avec la croissance du diamètre. En effet, à mesure que les racines mûrissent, leur diamètre devient plus important et leur porosité augmente considérablement.

Notons que la teneur en eau des racines est parfois exprimée dans la littérature en fraction volumique (θ_v) au lieu d'une fraction gravimétrique (θ_g). Ces deux grandeurs sont liées entre elles par la gravité spécifique (GS) du bois de la racine comme exprimé par l'équation (3.7). Ainsi, la conversion de la teneur en eau volumique en gravimétrique nécessite la connaissance de la gravité spécifique du bois de la racine sous test. Une liste des valeurs de gravités spécifiques selon l'espèce d'arbre est disponible sur : <https://www.wagnermeters.com/specific-gravity/>.

$$\theta_v = \theta_g \times GS \quad (3.7)$$

En ce qui concerne les racines en dessous du PSF, le modèle de Maxwell-Garnett ne peut pas être utilisé directement dans cette région car la permittivité diélectrique de l'eau liée est régie par des lois plus complexes. Cependant, la constante diélectrique de la racine au Point Complètement Sec (PCS) (figure 3.2) peut être calculée à l'aide du modèle Maxwell-Garnett en supposant que la racine est constituée exclusivement de matière ligneuse sèche et d'air au PCS. Comparée à la pente de la permittivité diélectrique par rapport à la teneur en eau au-dessus du PSF, la variation de la permittivité diélectrique des racines en dessous du PSF est relativement faible (figure 3.3). Par conséquent, pour les racines inférieures au PSF, nous déduisons la constante diélectrique par interpolation linéaire entre le PSF et le PCS.

Modèle de conductivité électrique

D'après Glass and Zelinka [2010], la conductivité électrique du bois dépend de sa teneur en eau. Pour les racines en dessous du PSF, une relation numérique établie par Straube et al. [2002] est utilisée pour l'estimation de la conductivité diélectrique des racines :

$$\log_{10}(\theta_g) = 2,99 - 2,113 \left(\log_{10} \left(\log_{10} \left(\frac{1}{\sigma} \right) \right) \right) \quad (3.8)$$

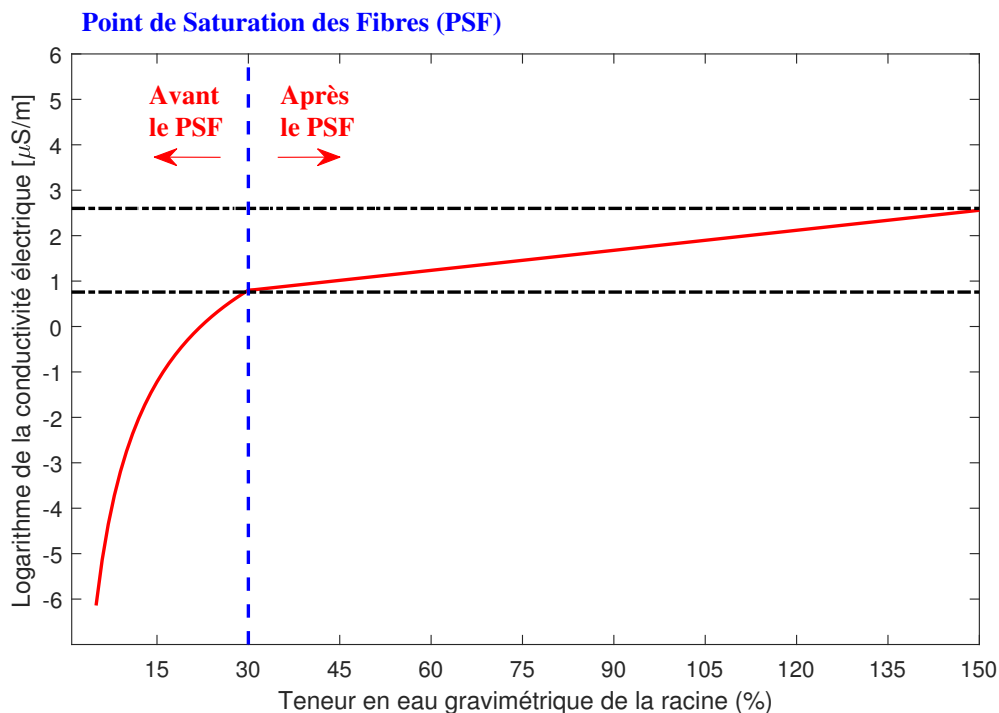


FIGURE 3.5 – Évolution de la conductivité électrique de la racine en fonction de la teneur en eau.

La figure 3.5 montre clairement qu'avant le PSF, la pente du logarithme de la conductivité électrique diminue avec l'augmentation de la teneur en eau. Lorsque le PSF est approché, la conductivité électrique augmente presque linéairement avec la teneur en eau. Par conséquent, pour les racines au-dessus du PSF, la conductivité électrique est supposée augmenter linéairement à mesure que la teneur en eau augmente, ce qui est confirmé par les résultats de Glass and Zelinka [2010]. La conductivité électrique estimée pour les racines au PSF est de 10^{-5} S/m, tandis que celle estimée au PCS est de 10^{-3} S/m (voir la variation linéaire de la conductivité sur la figure 3.5).

3.2.2 Impact du diamètre et de la teneur en eau sur la détectabilité des racines

Étant donné que le pouvoir de réflexion des racines est déterminé par le contraste entre les permittivités de celles-ci et celle du sol, l'amplitude du signal réfléchi est étroitement liée à leur teneur en eau. Hirano et al. [2009] ont réalisé des mesures GPR sur des racines dans un environnement contrôlé. Ils se sont intéressés à la mesure des indicateurs présents dans la figure 3.6 (en bleu) afin de les relier aux propriétés de celle-ci (diamètre et teneur en eau principalement). Nous avons pu noter, à partir de leur résultats, que la valeur des indicateurs issus des petites racines (de faible diamètre) avec une teneur en eau plus élevée était plus importante que celle des indicateurs issus des racines plus grandes avec une teneur en eau plus faible (voir tableau 1 dans Hirano et al. [2009]). Par conséquent, la détectabilité des racines ne peut être étudiée sans tenir compte de l'impact simultané du diamètre et de la teneur en eau.

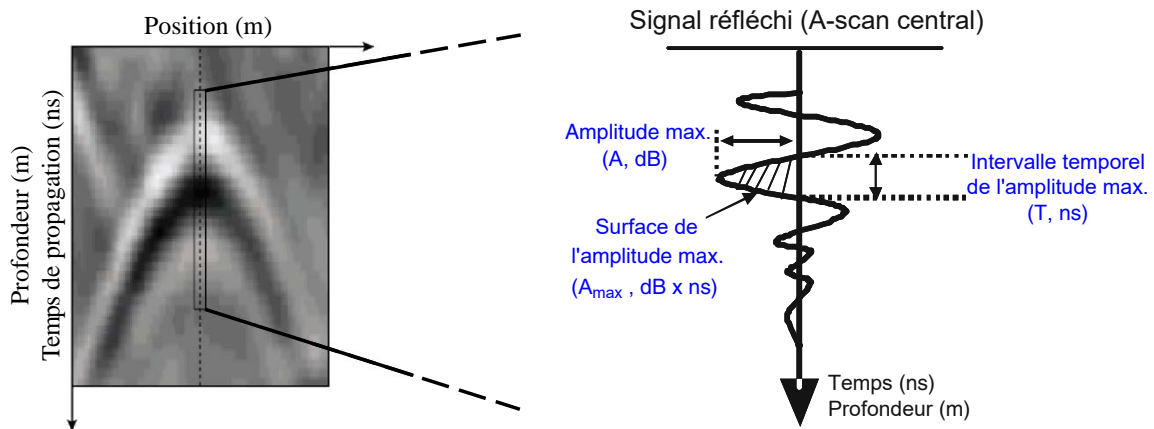


FIGURE 3.6 – B-scan avec réflexion hyperbolique de la racine (à gauche) ; et les différents indices du signal réfléchi (à droite) extraits du A-scan passant par le centre de la section de la racine (indiqué en pointillés sur l'image de gauche) (modifié de Hirano et al. [2009]).

Dans ce sens, nous avons réalisé une étude paramétrique dans Aboudourib et al. [2019] à partir des simulations numériques sur gprMax (cas 2-D). Les 10 valeurs de diamètres de racines considérées varient de 0,5 cm à 5 cm avec un incrément de 0,5 cm. La teneur en eau volumique des racines varie de 5% à 50% avec un incrément de 5%. Ces plages de valeurs ont été choisies car communément utilisées dans les études des racines. Le scénario de l'environnement simulé sur gprMax est présenté sur la figure 3.7 et les paramètres des simulations sont résumés dans le tableau 3.1.

La gravité spécifique considérée dans cette étude est de $GS = 0,38$, une valeur qui correspond aux bois d'arbres de type Peuplier Tremble (*Populus tremuloides*), Camphrier (*Cinnamomum camphora*), Saule fragile (*Salix fragilis*), *Cryptomeria Japonica*, et autres.

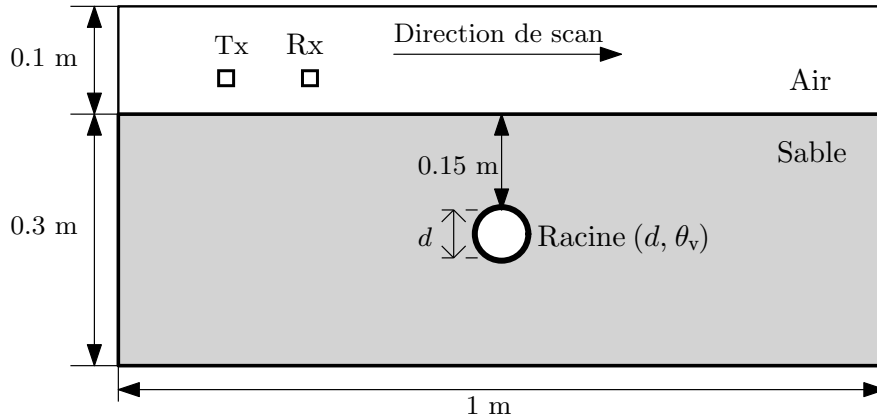


FIGURE 3.7 – Vue de coupe de l'environnement bidimensionnel simulé sur gprMax.

TABEAU 3.1 – Résumé des paramètres de la simulation.

Paramètre	Valeur
Antennes	Dipôles
Signal d'excitation	Ricker
Fréquence centrale	1,8 GHz
Pas de discrétisation	1 mm
Fenêtre temporelle	5 ns
Séparation Tx-Rx	10 cm
Séparation Antennes-sol	5 cm
Pas de déplacement Tx-Rx	2 cm
Permittivité relative du sol	2,79
Conductivité électrique du sol	2,3 mS/m

Une chaîne de post-traitement des résultats de simulation a été appliquée. Toutefois, la classification des racines détectables et non-détectables nécessitait d'abord la normalisation des B-scans correspondants. Pour cela, des mesures ont été réalisées au laboratoire dans des conditions optimales sur des racines fraîchement extraites (en chambre anéchoïque) afin de définir une référence de l'échelle des couleurs pour les B-scans de la simulation (figure 3.8).

À la fin du post-traitement, les images ont été converties en niveaux de gris à 8 bits. À chaque pixel est attribuée une valeur d'intensité qui indique son degré de clarté ou d'obscurité, 0 étant noir, 255 blanc et les valeurs intermédiaires correspondant aux nuances de gris. Comme toutes les racines simulées possèdent un diamètre supérieur ou égal à 0,5 cm, Butnor et al. [2003] indique que les racines détectables sont celles dont l'intensité des pixels se situe dans l'intervalle [60–200].

Un exemple de B-scan de deux racines simulées après traitement est donné sur la figure 3.9 à titre d'illustration. En appliquant ce processus, nous avons établi la grille de détectabilité bidimensionnelle présentée dans la figure 3.10. Les détails de la procédure de post-traitement ainsi que les paramètres de la mesure au laboratoire peuvent être consultés dans les chapitres 4 et 5, respectivement.

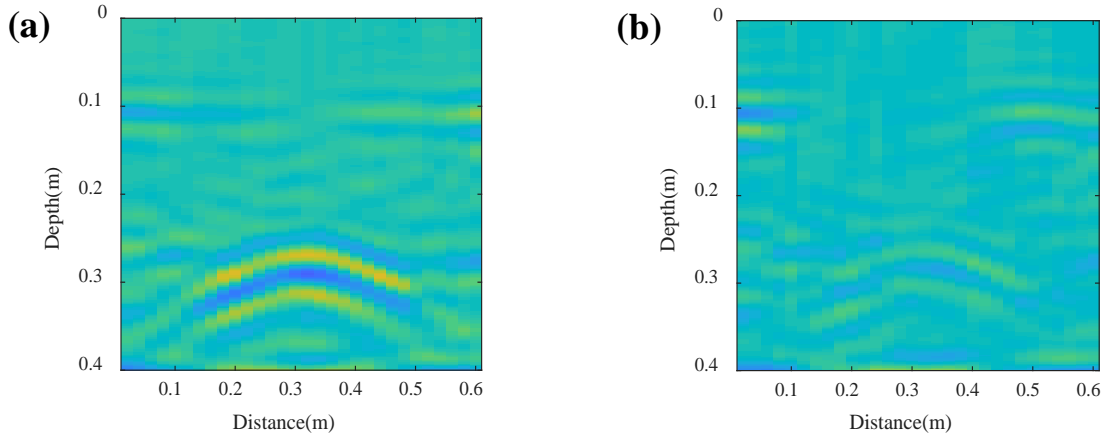


FIGURE 3.8 – B-scans issus des mesures expérimentales au laboratoire. **(a)** racine détectable ($d = 3,5\text{ cm}$; $\theta_v = 35\%$); **(b)** racine non-détectable ($d = 2\text{ cm}$; $\theta_v = 10\%$).

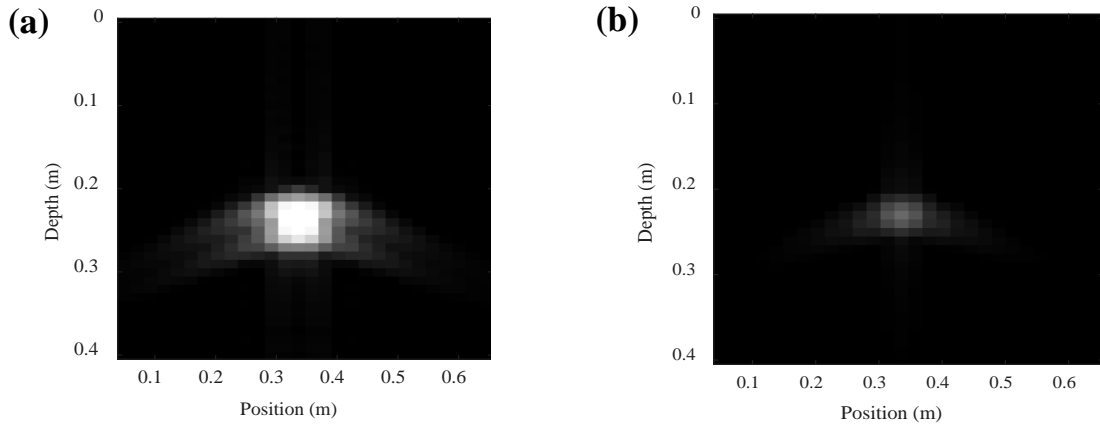


FIGURE 3.9 – Résultats du traitement des données de simulation pour deux exemples de racines. **(a)** racine détectable ($d = 3,5\text{ cm}$; $\theta_v = 35\%$; intensité des pixels : 164), **(b)** racine non-détectable ($d = 2\text{ cm}$; $\theta_v = 10\%$; intensité des pixels : 27).

A partir de la grille établie, nous pouvons lire qu'une teneur en eau volumique des racines de 10% correspond à une permittivité relative dans la plage [2,73 - 3,11] (selon le diamètre de la racine). Dans cette situation, le contraste entre les racines et le sol environnant ($\epsilon_r = 2,79$) est très faible. Cela justifie l'incapacité de détecter, par le système GPR, les racines situées sur les deux premières lignes de la grille. De plus, l'impact du diamètre des racines et de la teneur en eau est clairement remarqué avec les petites racines (diamètre $< 1,5\text{ cm}$). Par exemple, les racines d'un diamètre de 0,5 cm nécessitent une teneur en eau volumique d'au moins 35% pour être détectées, tandis que cette valeur passe à 20% pour les racines de 1 cm de diamètre.

Nous pouvons également constater à partir des résultats de l'étude paramétrique, qu'une racine ligneuse de diamètre 5 cm et de teneur en eau de 10% n'est pas détectable par GPR, tandis qu'une petite racine de diamètre 5 fois plus faible (1 cm) est détectable avec seulement le double de la teneur en eau volumique (20%). Ainsi, nos résultats complètent ceux des mesures réalisées par Hirano et al. [2009], et confirment l'importance de la teneur en eau en tant que facteur déterminant dans la détection des racines par GPR.

Enfin, la ligne rouge sur la grille de la figure 3.10 marque la limite entre les racines détectables et celles indétectables par GPR. Cette dernière étant gérée par les facteurs {diamètre et teneur en eau}, le changement d'un certain nombre de paramètres de la simulation ne changera pas l'allure de cette limite (signal d'excitation, puissance de l'antenne émettrice, profondeur de la racine, sol plus saturé, etc.).

d (cm) θ_v (%)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
5	2,55 △	2,45 △	2,41 △	2,40 △	2,39 △	2,38 △	2,38 △	2,37 △	2,37 △	2,37 △
10	3,11 △	2,90 △	2,83 △	2,80 △	2,78 △	2,76 △	2,75 △	2,74 △	2,74 △	2,73 △
15	4,91 △	4,47 △	4,33 ▲	4,26 ▲	4,22 ▲	4,20 ▲	4,18 ▲	4,16 ▲	4,15 ▲	4,14 ▲
20	7,43 △	6,68 ▲	6,44 ▲	6,32 ▲	6,25 ▲	6,21 ▲	6,17 ▲	6,15 ▲	6,13 ▲	6,11 ▲
25	10,23 △	9,10 ▲	8,74 ▲	8,56 ▲	8,46 ▲	8,40 ▲	8,34 ▲	8,31 ▲	8,28 ▲	8,26 ▲
30	13,38 △	11,79 ▲	11,31 ▲	11,04 ▲	10,90 ▲	10,80 ▲	10,72 ▲	10,67 ▲	10,63 ▲	10,60 ▲
35	16,93 ▲	14,75 ▲	14,08 ▲	13,75 ▲	13,56 ▲	13,43 ▲	13,34 ▲	13,27 ▲	13,22 ▲	13,18 ▲
40	20,98 ▲	18,10 ▲	17,20 ▲	16,78 ▲	16,52 ▲	16,36 ▲	16,24 ▲	16,15 ▲	16,08 ▲	16,02 ▲
45	25,63 ▲	21,85 ▲	20,70 ▲	20,16 ▲	19,83 ▲	19,62 ▲	19,46 ▲	19,36 ▲	19,26 ▲	19,20 ▲
50	31,02 ▲	26,10 ▲	24,64 ▲	23,93 ▲	23,52 ▲	23,25 ▲	23,05 ▲	22,91 ▲	22,80 ▲	22,71 ▲

FIGURE 3.10 – Grille de détectabilité des racines selon leurs diamètres et teneurs en eau volumiques. La valeur indiquée dans chaque case correspond à la permittivité relative de la racine simulée. Les racines détectables sont désignées par des triangles remplis; celles indétectables par des triangles vides.

3.3 Position géométrique de la racine

3.3.1 Modèle topologique de racine

Comme illustré dans le chapitre 2, de par sa morphologie générale et les racines qui la composent, l'architecture du système racinaire joue un rôle essentiel dans le maintien mécanique de l'arbre au cours de son développement. La mise en place de cette architecture au cours du temps est d'abord déterminée génétiquement. Elle est formée selon un continuum, où les racines se mettent en place selon un ordre défini. Ce programme morphogénétique varie d'une espèce à l'autre. Ces variations génétiques sont notamment le résultat d'adaptations des arbres à leur environnement (charge de vent, type de sol, disponibilité en eau et nutriments). Au sein d'une même espèce, on observe parfois des différences dans la mise en place du système racinaire. Cette plasticité va fournir à l'arbre un réel avantage, lui permettant de collecter les signaux et informations extérieures et d'y réagir en modifiant sa croissance et son développement. Ces modifications permettent à l'arbre, immobile, d'acclimater sa structure dans une nouvelle position dans son environnement [Saint Cast, 2019].

La structure géométrique et le positionnement des racines dans leur système (topologie) ont été largement étudiés ces dernières décennies [Berntson, 1997; Bouma et al., 2001; Fitter, 1987]. L'architecture racinaire va se mettre en place selon un processus plus ou moins complexe de ramification. En effet, les racines ne sont pas connectées les unes aux autres de façon aléatoire mais selon un schéma spécifique et hiérarchisé. Deux schémas de ramifications principaux ont été observés chez les arbres : dichotomique et à chevrons (*Herringbone*) (figure 3.11). Dans un diagramme de ramification, la position d'une racine est souvent définie selon son « ordre de ramification ». Le premier ordre correspondant à la première racine émise et le dernier, aux plus distales dans la structure. Avec les architectures à chevrons, la ramification est confinée à l'axe principal tandis qu'un système dichotomique a une ramification égale sur tous les liens.

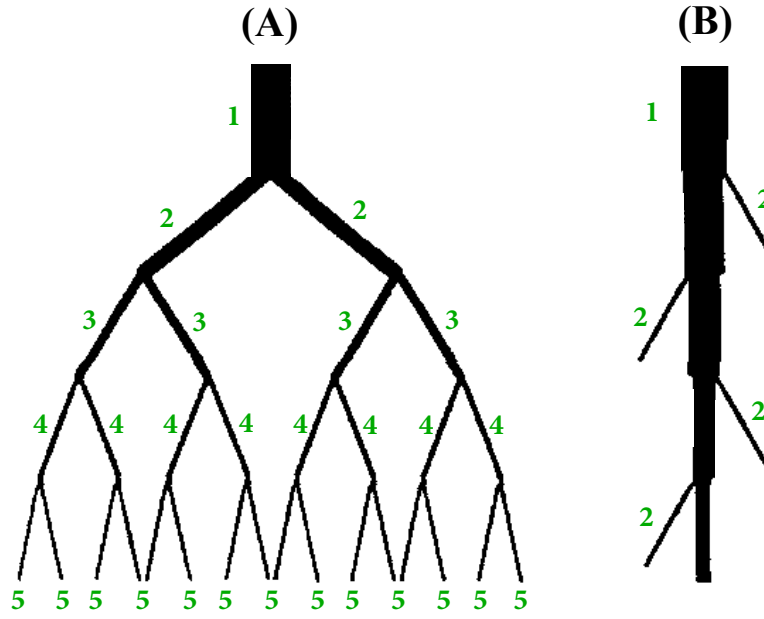


FIGURE 3.11 – Modèle de ramification racinaire (A) dichotomique (B) à chevrons (*Herringbone*). Le numéro indiqué à côté de chaque branche désigne son ordre de ramification.

L'ordre de ramification d'une racine dans son système modifiera ses processus anatomiques et physiologiques : sa durée de vie (ex : diminution de la longévité) ; sa croissance (ex : diminution du taux d'élongation) ; et sa fonction au sein du système racinaire (ex : les premiers ordres de ramification sont davantage impliqués dans l'ancrage et le stockage alors que les ordres élevés sont davantage impliqués dans la captation et le transport des ressources).

Par ailleurs, [Oppelt et al. \[2001\]](#) ont proposé des indices afin de classifier les diagrammes de ramification. En effet, lors de l'examen des propriétés métriques des systèmes racinaires, la question se pose de savoir comment les diamètres avant et après les nœuds de branchement sont liés les uns aux autres. En considérant les branches racinaires comme des cylindres concentriques, Leonardo da Vinci affirme dans son livre [\[Richter et al., 1970\]](#) que l'aire transversale d'un tronc ou d'une branche d'arbre est égale à la somme des aires transversales des branches à tout niveau supérieur. Localement, cela signifie que dans chaque nœud de ramification où n branches filles émergent, le diamètre d avant le nœud est lié aux diamètres $d_i (i = 1, 2, \dots, n)$ (figure 3.12) des branches filles par :

$$d^2 = \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad (3.9)$$

L'équation (3.9) a été utilisée dans de nombreux modèles de fonctionnement et de croissance de plantes et a été popularisée sous le nom de théorie de «la tige de tuyau» (*Pipe stem theory*). Diverses généralisations de l'équation (3.9) ont été proposées, l'une d'elles est :

$$d^\Delta = \sum_{i=1}^n d_i^\Delta \quad (3.10)$$

où le paramètre Δ est appelé exposant du diamètre du système. D'après [Eloy \[2011\]](#), cet exposant varie dans l'intervalle $1.8 < \Delta < 2.3$ pour un grand nombre d'espèces d'arbres. En revanche, en se basant sur la théorie des fractales pour le développement racinaire, [Mandelbrot \[1978\]](#) a obtenu une valeur de 2 pour Δ , confirmant ainsi la règle de Leonardo.

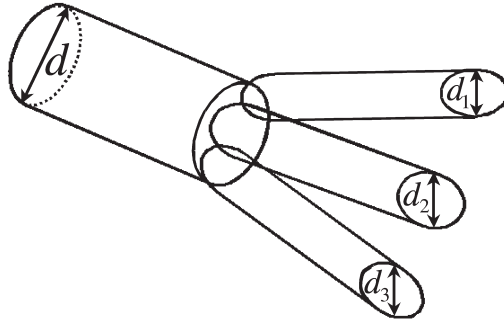


FIGURE 3.12 – Principe de la règle de Leonardo, qui s'exprime mathématiquement par l'équation (3.9) (d'après Oppelt et al. [2001]).

Une deuxième généralisation de l'équation (3.9) est donnée par van Noordwijk et al. [1994] :

$$d^2 = \alpha \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad (3.11)$$

et :

$$\beta = \frac{d_i^2}{d^2} \quad (3.12)$$

où α est un facteur de proportionnalité ($0.8 < \alpha < 2.0$) et β ($0 < \beta < 1$) un coefficient mesurant le rapport d'asymétrie d'une branche particulière par rapport à la branche mère et reflète la taille de la branche fille.

3.3.2 Impact de l'orientation de la racine sur les données GPR

Les différentes formes géométriques que peuvent prendre les racines de par leur topologie, impliquent une multitude d'orientations des branches de racines par rapport à la direction de mesure par les antennes GPR. En effet, l'intensité et la forme des signaux GPR réfléchis par les racines sont affectées par l'orientation de celles-ci et la direction du scan.

D'après les données GPR recueillies sur des racines enfouies dans le sable, Tanikawa et al. [2013] ont examiné les indicateurs du signal réfléchi afin de modéliser l'effet des différentes orientations horizontales des racines. Cet effet a été statistiquement traduit par la relation sinusoïdale qui gouverne la surface de l'amplitude maximale :

$$A(\alpha) = -a \cos\left(\frac{2\pi}{360}(2\alpha + b)\right) + c \quad (3.13)$$

où α (en degrés) est l'angle horizontal formé par la racine et la ligne de scan (*i.e.*, $\alpha = 0^\circ$, la ligne de scan est parallèle à la racine), a est la variation maximale de la surface d'amplitude A ($\text{dB} \times \text{ns}$), b désigne un décalage de phase (en degrés) ($b < \alpha$), et c une valeur d'offset ($\text{dB} \times \text{ns}$). La relation (3.13) a été validée par des mesures sur le terrain (voir Tanikawa et al. [2013]).

La figure 3.13 décrit la variation de la surface de l'amplitude $A(\alpha)$ de manière générale. La forme sinusoïdale devient plus plate avec la décroissance du diamètre et de la teneur en eau de la racine. Comme illustré sur la même figure, le maximum de A est obtenu à $\alpha = 90^\circ$ et vaut $(c + a)$. En effet, lorsque la ligne de scan coupe orthogonalement une racine, la polarisation du champ EM est parallèle à l'orientation de celle-ci. Dans ce cas, la majeure partie de la section racinaire se trouve dans l'empreinte de l'antenne et renvoie l'énergie vers le récepteur, générant ainsi l'amplitude de réflexion maximale. En revanche, le minimum de A est obtenu lorsque la ligne de scan est parallèle à la racine ($\alpha = 0^\circ$) et vaut $(c - a)$ (figure 3.13). Dans ce cas, la polarisation du champ EM est perpendiculaire à l'orientation de la racine et les signaux réfléchis sont de faibles amplitudes. Par conséquent, $A(0^\circ)$ mesure principalement la réponse du sol plutôt que la réflexion de la racine.

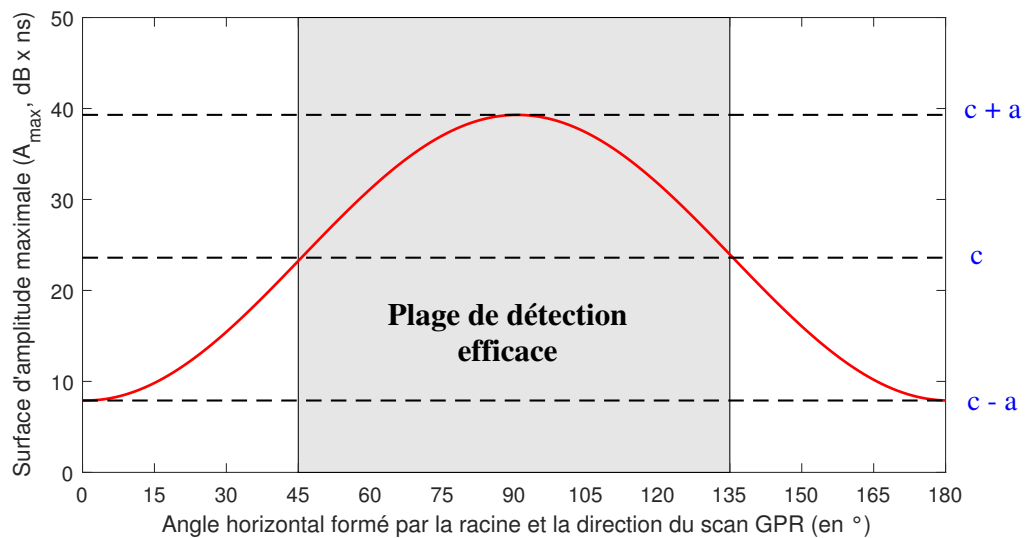


FIGURE 3.13 – La variation sinusoïdale de la surface d’amplitude maximale du signal réfléchi par la racine en fonction de l’angle d’orientation de celle-ci par rapport à la direction de mesure GPR.

D’après Tanikawa et al. [2013], il devient difficile d’identifier les racines dans les radargrammes GPR lorsque l’angle d’orientation horizontal est en dehors de la plage $[45^\circ - 135^\circ]$ (zone en gris sur la figure 3.13). En effet, en dehors de cette zone, les réflexions provenant des racines sont déformées. Par conséquent, il devient difficile d’interpréter les images correspondantes. Néanmoins, l’atténuation de $A(\alpha)$ causée par l’angle horizontal α pourrait être compensée en estimant $A(90^\circ)$ à partir de multiples mesures de $A(\alpha)$. Dans ce sens, Tanikawa et al. [2013] ont proposé d’effectuer des mesures selon une grille de deux directions perpendiculaires (figure 3.14a) afin d’estimer $A(90^\circ)$. Une seconde technique plus précise a été proposée par la suite par Tanikawa et al. [2014], faisant appel à une troisième direction de mesure selon des lignes diagonales (figure 3.14b). Guo et al. [2015] ont ensuite proposé une version modifiée de cette méthode des trois directions de scans, en développant une nouvelle technique plus efficace pour l’estimation du $A(90^\circ)$. Cette technique est basée sur deux mesures de $A(\alpha)$ complétées par une mesure de la réponse du sol.

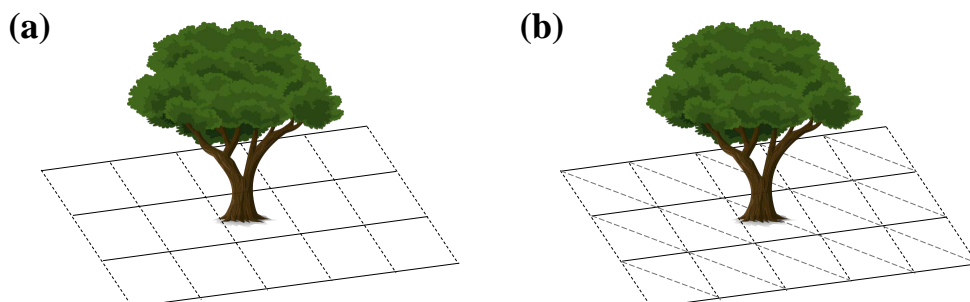


FIGURE 3.14 – Acquisition de données GPR sous forme de (a) grilles carrées; (b) grilles carrées avec des lignes diagonales.

Toutefois, ces études se sont focalisées sur l'impact de l'angle d'orientation horizontale α sur le signal GPR tandis que l'inclinaison verticale de la racine a été négligée. Ajoutons à cela qu'il est difficile, dans une approche d'inversion, d'extraire l'information sur l'angle d'orientation de la racine uniquement à partir de l'amplitude du signal, car cette dernière varie selon plusieurs facteurs comme l'humidité du sol, le diamètre de la racine et sa teneur en eau.

Dans cette perspective, Liu et al. [2018] ont proposé un modèle où les deux orientations horizontale (α) et verticale (β) ont été prises en compte pour définir l'orientation de la racine. Validé sur des données de simulation et de mesure, ce modèle permet non seulement d'analyser l'impact de l'orientation de la racine sur les signaux GPR, mais aussi de retrouver les valeurs des angles d'inclinaison α et β à partir des B-scans en appliquant une procédure de raccordement d'hyperbole (*hyperbola fitting*). Le système de coordonnées spatiales lié à la modélisation du problème d'orientation des racines est montré sur la figure 3.15. Les équations qui régissent ce modèle s'écrivent comme suit :

$$d = \sqrt{P(l - l_0)^2 + Q(l - l_0) + R} \quad (3.14)$$

avec :

$$\begin{cases} P = \sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha) \sin^2(\beta) \\ Q = 2 h_0 \cos(\alpha) \sin(\beta) \cos(\beta) \\ R = h_0^2 \cos^2(\beta) \end{cases} \quad (3.15)$$

où l est l'axe de la ligne de mesure, l_0 le décalage entre le point de départ de la mesure GPR et l'origine du repère, d exprime la profondeur (en mètres) et liée au temps de propagation de l'onde EM par l'équation (3.16) qui nécessite la connaissance de la permittivité diélectrique relative du sol (ϵ_r).

$$d = \frac{vt}{2} = \frac{c t}{2 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.16)$$

En pratique, les plages de variations des angles α et β sont respectivement de $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ et $0 \leq \beta \leq \frac{\pi}{4}$. Pour illustrer l'effet de la position relative de la racine et la ligne de mesure GPR, nous avons présenté sur les figures 3.16 et 3.17 les réflexions des racines selon leurs angles d'orientation horizontaux et verticaux, respectivement.

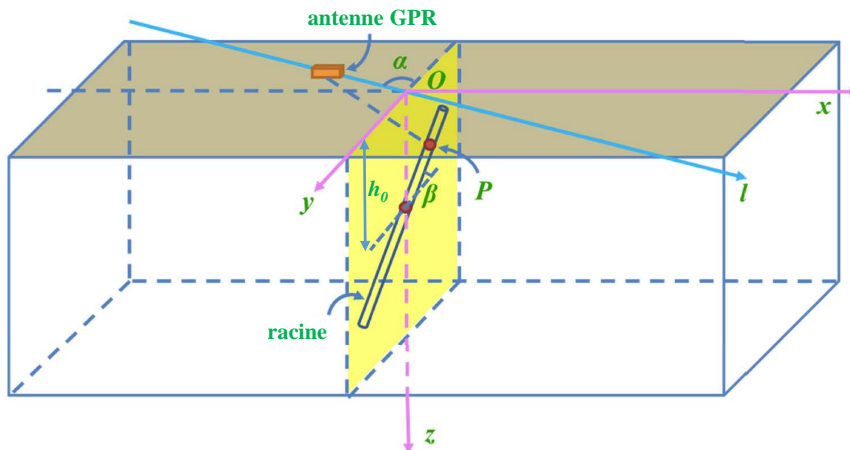


FIGURE 3.15 – Illustration du système de coordonnées spatiales nécessaire à la modélisation du problème d'orientation de la racine. (modifié de Liu et al. [2018])

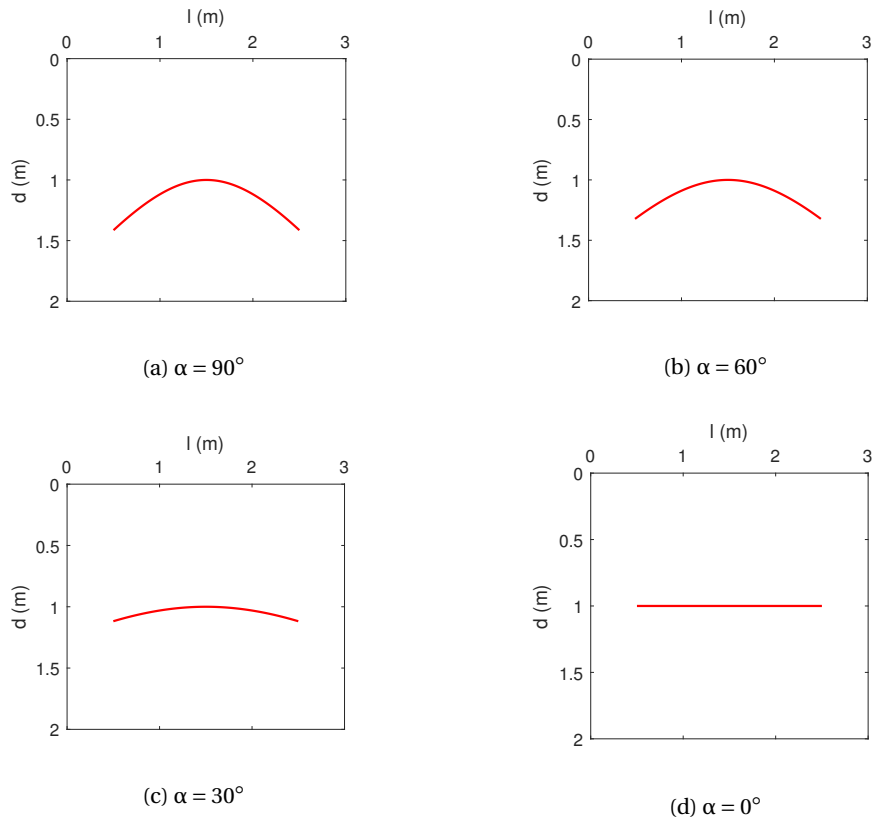


FIGURE 3.16 – Formation des hyperboles GPR pour différents angles d'orientation horizontales (α) de la racine et un angle d'orientation vertical fixe de $\beta = 0^\circ$.

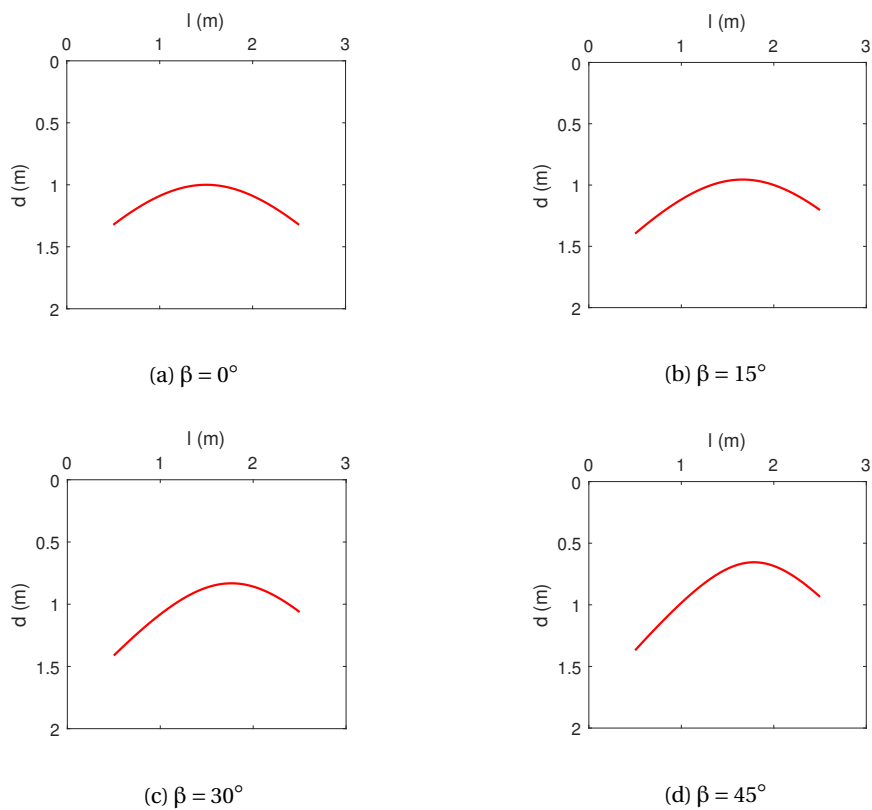


FIGURE 3.17 – Formation des hyperboles GPR pour différents angles d'orientation verticaux (β) de la racine et un angle d'orientation horizontal fixe de $\alpha = 60^\circ$.

D'après ces résultats, il est clair que la forme de la réflexion hyperbolique change avec l'angle d'orientation de la racine. Pour être plus précis, la condition optimale pour la détection d'une racine avec GPR est pour $\alpha = 90^\circ$ et $\beta = 0$ qui est montrée sur la figure 3.16a avec une hyperbole complètement formée. Cependant, la forme géométrique de l'hyperbole change de manière significative avec la diminution de α et l'augmentation de β . En d'autres termes, lorsque l'orientation horizontale α diminue, les hyperboles ont tendance à devenir plus plates. Avec l'augmentation de β , l'asymétrie des hyperboles devient plus importante, accompagnée d'un décalage du sommet vers le haut. En effet, lorsque β augmente, une extrémité de la racine se trouve inclinée, ce qui réduit l'espacement entre l'antenne et la racine.

Enfin, l'ensemble de ces constatations confirme que l'angle relatif entre la ligne de mesure GPR et la direction des racines a un impact substantiel sur la forme de l'hyperbole de réflexion et peut dans certains cas, entraver la détection des racines par GPR.

3.4 Propriétés du sol

3.4.1 Contexte

Les sols naturels sont des milieux complexes, composés de multiples constituants (eau, minéraux, air, matière organique, etc.)² aux propriétés diélectriques variées. En général, les sols sont classés par la distribution de la taille des particules qu'ils renferment. La figure 3.18 illustre la granulométrie du sol. L'argile possède le plus petit espacement entre particules et pores, suivie du limon, puis du sable avec les particules de plus grandes tailles.

Dans la mesure où la plupart des sols naturels sont hétérogènes, plusieurs types de sols peuvent être mélangés ensemble. Les pourcentages relatifs de chaque fraction du sol sont déterminés et un caractère général du sol peut être déduit en utilisant le triangle de texture (figure 3.19) défini par le [United States Department of Agriculture \(USDA\)](#). Ce triangle est considéré comme un outil de référence qui permet de classer le sol en fonction de sa composition texturale. Par exemple, si l'on prend un échantillon de sol contenant environ 40% de limon, 40% de sable et 20% d'argile, alors on peut voir à partir du triangle textural qu'il s'agit d'un sol limoneux.

Les caractéristiques les plus importantes d'un sol sont sa capacité de rétention de l'eau et l'adsorption³ des composés organiques. Les sols argileux sont connus par leur grande surface spécifique, leur permettant de fortes capacités d'échanges cationiques, et par conséquent une forte capacité d'adsorption. Ils sont aussi connus par leurs propriétés colloïdales et leur forte capacité de rétention d'eau par rapport aux sols sableux et sols limoneux qui ont une capacité d'adsorption négligeable [Walker et al., 1998].

Un autre facteur qui limite le développement des racines est le compactage du sol. Par définition, le compactage du sol signifie que la densité du sol augmente lorsqu'il est comprimé (chaque litre de terre pèse davantage lorsque les pores sont comprimés). Ce procédé diminue l'aération du sol, restreint le mouvement de l'air et de l'eau, limite la capacité de rétention d'eau et entrave la croissance des racines. Il s'agit d'un problème qui touche plus particulièrement les zones urbaines car il entre en conflit avec les spécifications d'ingénierie routière, qui nécessitent une base porteuse pour supporter le poids de la chaussée. Pour cette fin, il est essentiel d'augmenter le compactage du sol afin d'augmenter le contact entre les particules du sol, conférant ainsi à la structure lithique une résistance au frottement plus élevée. De plus, cela minimise l'affaissement différé, offrant une plus grande sécurité à l'infrastructure. D'un autre côté, le niveau de compactage qui en résulte crée des conditions insupportables pour la croissance des racines [Grabosky et al., 2009] car il limite l'accès à l'oxygène, à l'eau et aux nutriments.

La densité apparente du sol (ρ_a) et sa porosité (ϕ) sont deux indicateurs clés de l'aptitude à la croissance des racines et à la perméabilité du sol. Ils sont d'une importance vitale pour le système

2. Un sol typique comprend environ 50% de solides (45% de matières minérales et 5% de matière organique) et 50% de vides (ou pores) dont la moitié est occupée par l'eau et l'autre moitié par le gaz.

3. L'adsorption est un phénomène de surface par lequel des atomes, des ions ou des molécules (adsorbats) se fixent sur une surface solide (adsorbant) depuis une phase gazeuse, liquide ou une solution solide.

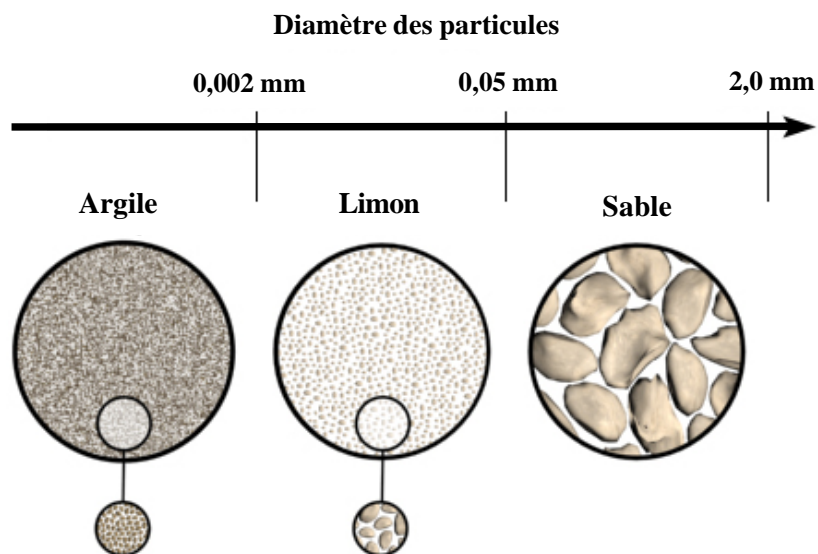


FIGURE 3.18 – Taille des particules du sol [Gee and Or, 2002].

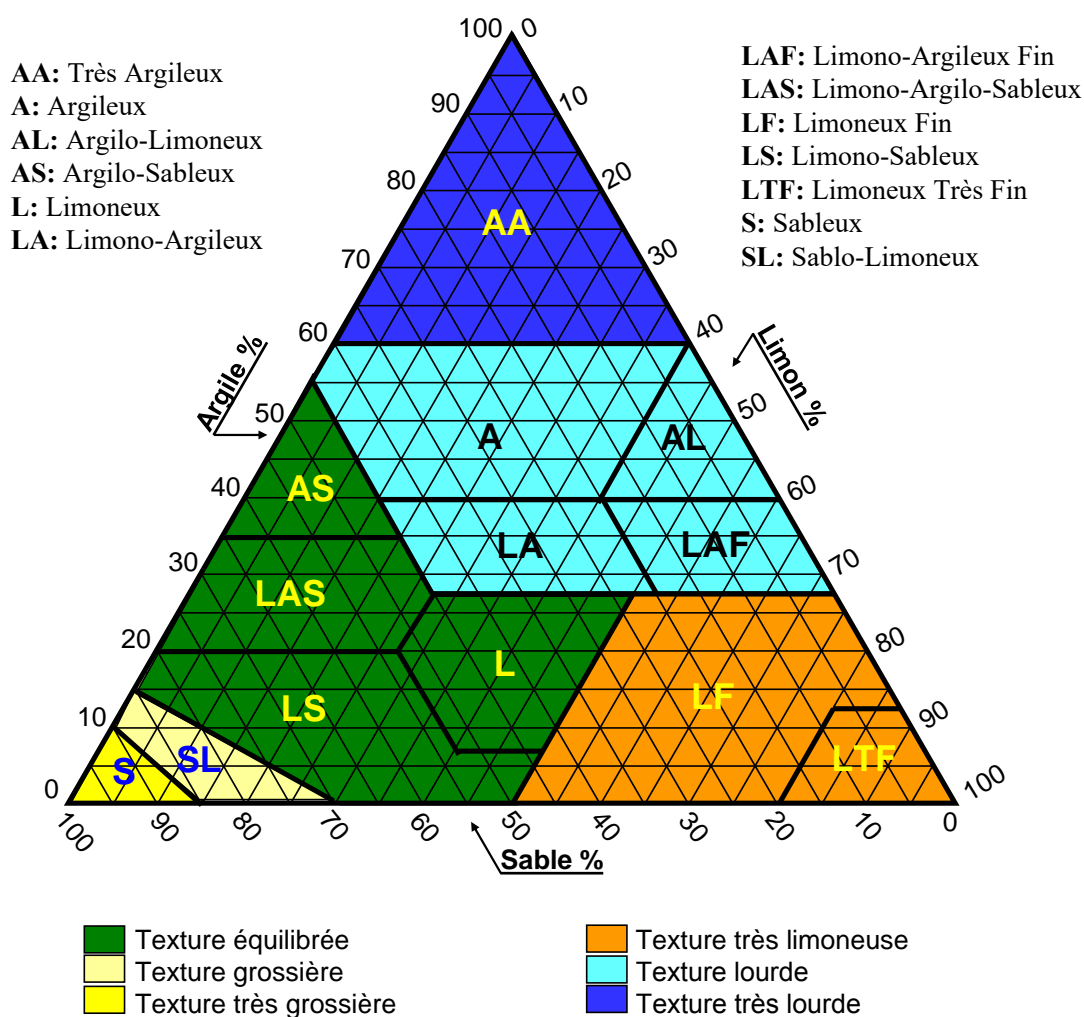


FIGURE 3.19 – Triangle textural pour l'identification et la classification des sols selon les pourcentages d'argile, limon et sable [Groenendyk et al., 2015].

sol-racine-atmosphère [McKenzie et al., 2004]. La densité apparente d'un sol est définie comme le rapport entre la masse des solides (M_s) et le volume total du sol (V_t) :

$$\rho_a = \frac{M_s}{V_t} \quad (3.17)$$

La porosité du sol, quant à elle, caractérise le volume des vides dans le sol. Elle est définie par le rapport entre le volume des vides (V_v) et le volume total du sol (V_t) :

$$\varphi = \frac{V_v}{V_t} \quad (3.18)$$

Si l'on définit la densité des particules du sol (ρ_s) par le rapport :

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (3.19)$$

où V_s est le volume de la partie solide du sol, alors la porosité du sol peut être liée à sa densité apparente par la relation :

$$\varphi = \frac{V_v}{V_v + V_s} = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \quad (3.20)$$

À noter que la densité apparente d'un sol est toujours inférieure à sa densité de particules, puisque la première est toujours rapportée au volume total apparent et non au volume des solides.

Afin d'assurer un bon environnement de développement des racines, il est généralement souhaitable d'avoir un sol avec une densité apparente faible ($< 1,5 \text{ g/cm}^3$) pour un mouvement optimal de l'air et de l'eau à travers le sol. La valeur critique de la densité apparente pour restreindre la croissance des racines varie selon le type de sol mais en général, les densités apparentes supérieures à $1,6 \text{ g/cm}^3$ ont tendance à restreindre la croissance des racines. Le tableau 3.2 compare les valeurs de densités apparentes pour différents types de sol selon leur taux de compactage (en %). La densité apparente du sol doit être inférieure à la valeur critique pour que les racines puissent pousser naturellement. Notons que la densité apparente augmente avec le compactage du sol et a tendance de diminuer avec la profondeur. Les sols sableux ont généralement des densités apparentes plus élevées ($1,3 - 1,7 \text{ g/cm}^3$) que les limons fins et les argiles ($1,1 - 1,6 \text{ g/cm}^3$) car ils ont des espaces poreux plus grands mais moins nombreux. Dans les sols argileux, les particules sont très petites et de nombreux petits espaces de pores se trouvent entre elles. Les sols riches en matière organique (par exemple les sols tourbeux) peuvent avoir des densités inférieures à $0,5 \text{ g/cm}^3$.

TABEAU 3.2 – Densités apparentes des sols [Nawaz et al., 2013].

Type du sol	Densité apparente [g/cm^3] selon le compactage du sol				Densité apparente critique [g/cm^3]
	70%	85%	90%	95%	
Sablo-limoneux	1,52	1,85	1,96	2,07	1,75
Limono-sableux	1,43	1,74	1,85	1,95	1,70
Argilo-sableux	1,29	1,56	1,66	1,75	1,50
Limoneux	1,19	1,45	1,53	1,62	1,40
Argilo-limoneux	1,22	1,49	1,58	1,66	1,40
Argileux	1,15	1,40	1,49	1,57	1,40

3.4.2 Modèles diélectriques du sol

Il existe de nombreux modèles qui décrivent les propriétés diélectriques des sols naturels. On distingue ici deux classes principales : les modèles dépendants du contenu volumétrique des composants (indépendants de la fréquence) et les modèles dépendants de la fréquence qui prennent en compte le phénomène de relaxation.

3.4.2.1 Modèles indépendants de la fréquence

Modèle de Topp

Topp et al. [1980] est le modèle empirique le plus connu et le plus utilisé dans le domaine du GPR. Il décrit la réponse diélectrique d'un sol quasi homogène en présence d'eau. Le modèle est inapproprié pour les argiles et les sols riches en matières organiques, mais convient assez bien pour les sols sableux et limoneux sur une large gamme de teneur en eau (jusqu'à 60%) dans la bande de fréquences [1 MHz - 1 GHz].

Établi sur la base du principe de la réflectométrie temporelle, ce modèle empirique fournit une description mathématique de la relation entre la teneur en eau et la permittivité diélectrique du sol sans pour autant l'expliquer par un modèle physique. L'équation de Topp est donnée par :

$$\epsilon_r = 3,03 + 9,3 \times \theta_v + 146 \times \theta_v^2 - 76,6 \times \theta_v^3 \quad (3.21)$$

où θ_v est la teneur en eau volumique du sol exprimée en (%).

La relation réciproque de l'équation de Topp s'exprime ainsi :

$$\theta_v = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \times \epsilon_r - 5,5 \cdot 10^{-4} \times \epsilon_r^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \times \epsilon_r^3 \quad (3.22)$$

L'équation de Topp suppose une valeur de 3,03 de permittivité relative à une teneur en eau nulle et suppose également une conductivité du sol négligeable.

Loi de mélange volumique

Ce modèle considère que le temps de propagation d'une onde EM dans un milieu est la somme des temps de propagation dans chacun de ses constituants. Le modèle **Complex Refractive Index Model (CRIM)** est issu de ce raisonnement, et fonctionne bien sur la gamme de fréquences [10 MHz - 1 GHz]. De plus, il a l'avantage d'être un modèle volumétrique qui ne nécessite que la connaissance des permittivités d'un matériau et de leurs pourcentages volumiques fractionnaires. Sa formule générale s'écrit comme suit [**Wharton et al., 1980**] :

$$\epsilon_r^\alpha = \sum_{i=1}^N \theta_i \epsilon_i^\alpha \quad (3.23)$$

où ϵ_r est la permittivité diélectrique relative du volume sol, ϵ_i la permittivité diélectrique relative du i^e constituant, θ_i sa fraction volumique correspondante, et α un paramètre approprié en fonction de l'orientation du champ électrique par rapport à la géométrie du milieu.

Un modèle triphasé du sol composé d'une couche d'air au-dessus d'une couche d'eau et d'une couche de matrice solide, est généralement approprié. On note ϵ_w , ϵ_a et ϵ_s les permittivités diélectriques relatives mesurées de l'eau, de l'air et de la matrice solide, respectivement. Ainsi, la formule **CRIM** devient :

$$\sqrt{\epsilon_r} = (1 - \phi) \sqrt{\epsilon_s} + \theta_v \sqrt{\epsilon_w} + (\phi - \theta_v) \sqrt{\epsilon_a} \quad (3.24)$$

où θ_v est la teneur en eau volumique et ϕ la porosité du sol.

Un des inconvénients de ce modèle est qu'il ne prend pas en compte les interactions EM qui peuvent exister entre les différents constituants du sol. Enfin, la figure 3.20 montre une comparaison de la permittivité diélectrique relative modélisée par **Topp et al. [1980]** et le modèle **CRIM** pour un sol sableux. Ces deux modèles semblent en bonne adéquation.

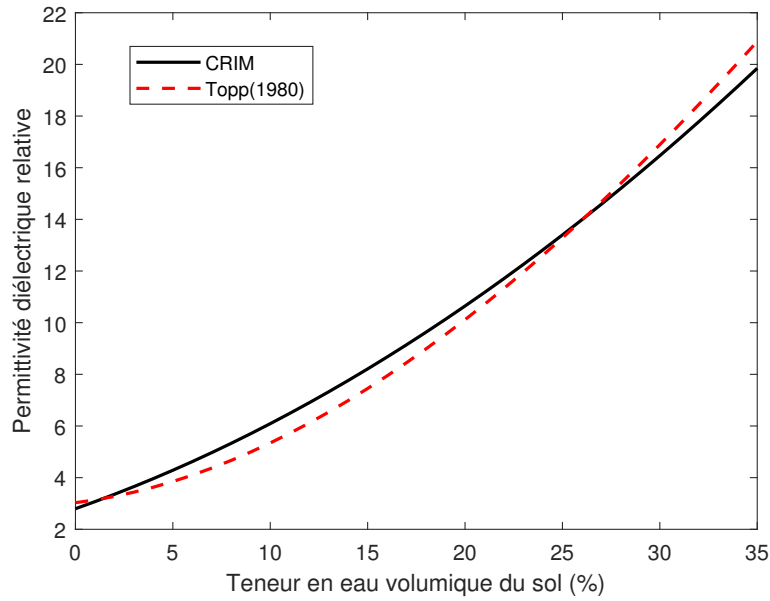


FIGURE 3.20 – La permittivité relative du sol modélisée par Topp et al. [1980] et CRIM pour un sol sableux. La porosité du sol et la permittivité de la matrice solide considérées sont de $\phi = 40\%$ et $\epsilon_s = 4,5$, respectivement.

3.4.2.2 Modèles dépendants de la fréquence

Modèle de Debye

Le modèle de Debye [1929] est le modèle le plus simple qui décrit le phénomène de relaxation dans un milieu homogène. La relation fournie par ce modèle décrit la réponse diélectrique du sol en fonction du temps de relaxation $t_{\omega,0}$, de la conductivité des paramètres statiques et des permittivités réelles à la fréquence nulle (dite permittivité statique – ϵ_s) et à l'infini (dite permittivité optique – ϵ_∞).

$$\epsilon_e(\omega) = \epsilon' - i\epsilon'' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + i\omega t_{\omega,0}} - i\frac{\sigma'}{\omega} \quad (3.25)$$

La figure 3.21 montre l'évolution des parties réelle et imaginaire de la permittivité complexe en fonction de la fréquence, pour le modèle Debye de l'eau pure à 25°C. La partie imaginaire de la permittivité ϵ'' présente un pic clair de dissipation à la fréquence de relaxation $\omega_p = 1/t_{\omega,0}$ correspondant au temps caractéristique $t_{\omega,0}$ ($t_{\omega,0} = 8,28$ ps ou $\omega_p = 19$ GHz dans ce cas), alors que la partie réelle ϵ' descend à sa limite en hautes fréquences $\epsilon_\infty = 5,6$.

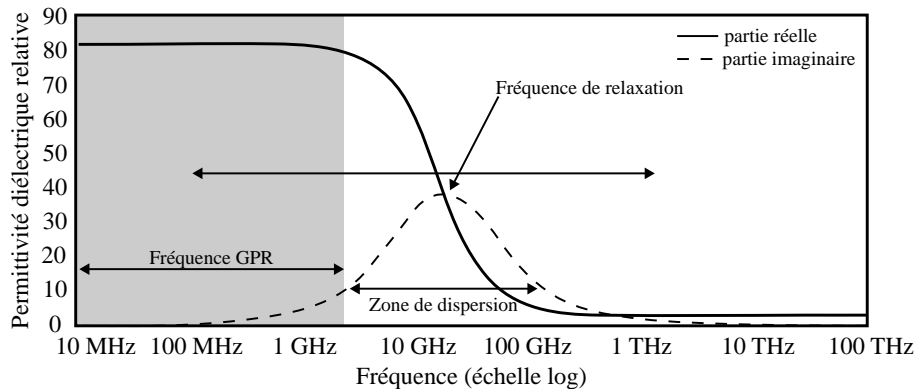


FIGURE 3.21 – Permittivité diélectrique en fonction de la fréquence (pour de l'eau libre pure à 25°C) illustrant le mécanisme de relaxation de Debye.

D'après la figure 3.21, on peut noter que dans la bande de fréquences GPR, la partie réelle de la permittivité diélectrique relative de l'eau est constante et que la partie imaginaire devient non négligeable à partir de 500 MHz environ. D'autre part, les effets thermiques font partie du processus de polarisation. Par conséquent, la température affecte la permittivité de l'eau de manière significative. Lorsque la température de l'eau diminue, sa permittivité diélectrique relative statique augmente et sa fréquence de relaxation diminue, ce qui rend les pertes diélectriques non négligeables. En effet, la permittivité statique de l'eau $\epsilon_{\omega,s}$ est liée à la température par l'équation empirique (3.26) établie par Klein and Swift [1977].

$$\epsilon_{\omega,s}(T) = 88,045 - 0,4147.T + 6,295 \times 10^{-4}T^2 + 1,075 \times 10^{-5}T^3 \quad (3.26)$$

où T désigne la température en (°C). Ainsi, à 0 °C (mais avant l'apparition de glace) la permittivité diélectrique relative statique de l'eau vaut 88 et sa fréquence de relaxation est d'environ 9 GHz [Cassidy, 2009]. Bien entendu, lorsque la glace se forme, les molécules d'eau ne sont plus libres et les pertes diélectriques sont à nouveau négligeables.

De manière similaire, le temps de relaxation d'eau $t_{\omega,0}$ varie en fonction de la température selon l'équation empirique (3.27) [Tran et al., 2012].

$$t_{\omega,0}(T) = \frac{1}{2\pi} (1,1109 \times 10^{-10} - 3,824 \times 10^{-12}T + 6,938 \times 10^{-14}T^2 - 5,096 \times 10^{-16}T^3) \quad (3.27)$$

Par la suite, d'autres modifications du modèle de Debye ont été introduites dans la littérature, comme le modèle de Cole-Cole [Cole and Cole, 1941] ou encore celui de Davidson-Cole [Williams and Watts, 1970].

Modèle de Peplinski

Dobson et al. [1985] a proposé un modèle qui relie les propriétés diélectriques des sols aux propriétés traditionnellement utilisées, à savoir la fraction d'argile et de sable, la fraction volumique de l'eau, la densité des particules du sol et la densité apparente. Cette approche est valable dans la plage fréquentielle de [1,4 – 18 GHz]. Elle sous-estime ϵ' et surestime ϵ'' pour les fréquences inférieures à 1,4 GHz. Pour surmonter cela, Peplinski et al. [1995] a proposé une correction au modèle semi-empirique suggéré initialement par Dobson et al. [1985]. Le modèle mis à jour est valable pour la gamme de fréquences de [0,3 – 1,3 GHz]. Ces modèles sont basés sur la loi de mélange volumique (équation (3.23)) en considérant un sol triphasique composé de particules de sol, d'inclusions d'eau et d'air. Contrairement au modèle de Topp, le modèle semi-empirique de Peplinski permet aussi d'estimer la conductivité du sol.

Le modèle de Peplinski est décrit par les équations (3.28 - 3.36), où $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$, f_w est la fraction volumique d'eau, ρ_s la densité des particules de sol, ρ_a la densité apparente du sol, ϵ_s la permittivité relative des particules de sol, $a = 0,65$ est une constante déterminée expérimentalement et S et C sont les fractions de masse de sable et d'argile respectivement ($0 \leq S, C \leq 1$ et $S + C = 1$).

La permittivité diélectrique complexe de l'eau est donnée par : $\epsilon_w = \epsilon'_w + i\epsilon''_w$ où $t_{0,w} = 9,23$ ps est le temps de relaxation pour $T = 20$ °C, $\epsilon_{w,s} = 80,1$ et $\epsilon_{w,\infty} = 4,9$ représentent les permittivités relatives de l'eau aux fréquences nulle et infinie, respectivement [Peplinski et al., 1995]. Finalement, le terme σ_f est linéairement proportionnel à la conductivité électrique σ .

$$\epsilon'_{(1,4-18 \text{ GHz})} = \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho_s} (\epsilon'_s - 1) + f_w^{\beta'} \epsilon'_w{}^a - f_w \right)^{1/a} \quad (3.28)$$

$$\epsilon'_{(0,3-1,3 \text{ GHz})} = 1,15 \epsilon'_{(1,4-18 \text{ GHz})} - 0,68 \quad (3.29)$$

$$\epsilon'' = f_w^{\beta''} \left(\frac{\sigma_f (\rho_s - \rho_a)}{\omega \epsilon_0 \rho_s f_w} - \epsilon''_w \right) \quad (3.30)$$

$$\epsilon_s = (1,01 + 0,44\rho_s)^2 - 0,062 \quad (3.31)$$

$$\beta' = 1,2748 - 0,519.S - 0,152.C \quad (3.32)$$

$$\beta'' = 1,33797 - 0,603.S - 0,166.C \quad (3.33)$$

$$\epsilon_{\omega} = \epsilon_{\omega,\infty} + \frac{\epsilon_{\omega,s} - \epsilon_{\omega,\infty}}{1 + i\omega t_{\omega,0}} \quad (3.34)$$

$$\sigma_{f(1,4-18 \text{ GHz})} = -1,645 + 1,939\rho_a - 2,25622.S + 1,594.C \quad (3.35)$$

$$\sigma_{f(0,3-1,3 \text{ GHz})} = 0,0467 + 0,2204\rho_a - 0,411.S + 0,6614.C \quad (3.36)$$

La figure 3.22 montre la permittivité diélectrique relative d'un sol sableux modélisée par Peplinski pour des fractions volumiques d'eau de 5% à 25% avec un pas de 5%. Il est clair que la partie réelle de la permittivité est pratiquement constante sur la plage de fréquence d'intérêt pour

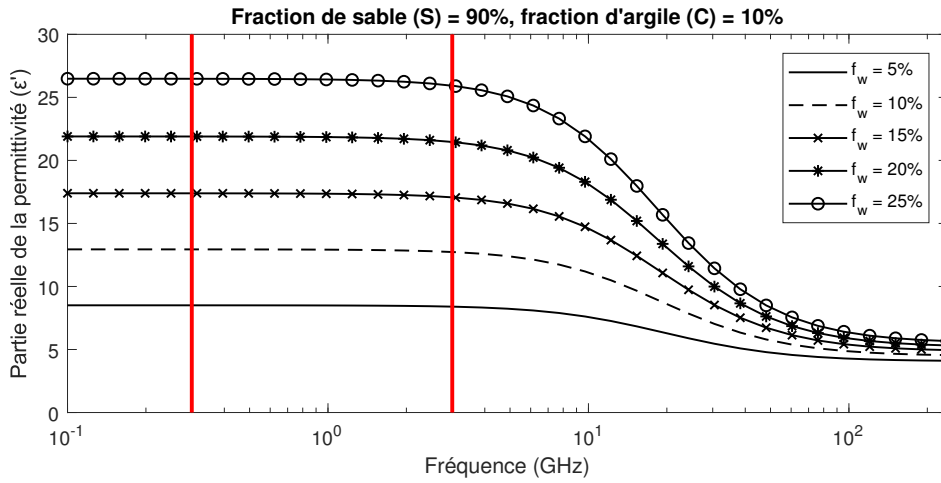


FIGURE 3.22 – La partie réelle de la permittivité diélectrique calculée par le modèle de Peplinski pour un sol avec les propriétés suivantes : $S = 0,9$, $C = 0,1$, $\rho_a = 2 \text{ g/cm}^3$ et $\rho_s = 2,66 \text{ g/cm}^3$ et $f_w = 5\% - 25\%$ avec un pas de 5%. La plage de fréquence de notre application GPR pour la détection des racines est délimitée par les deux traits en rouge.

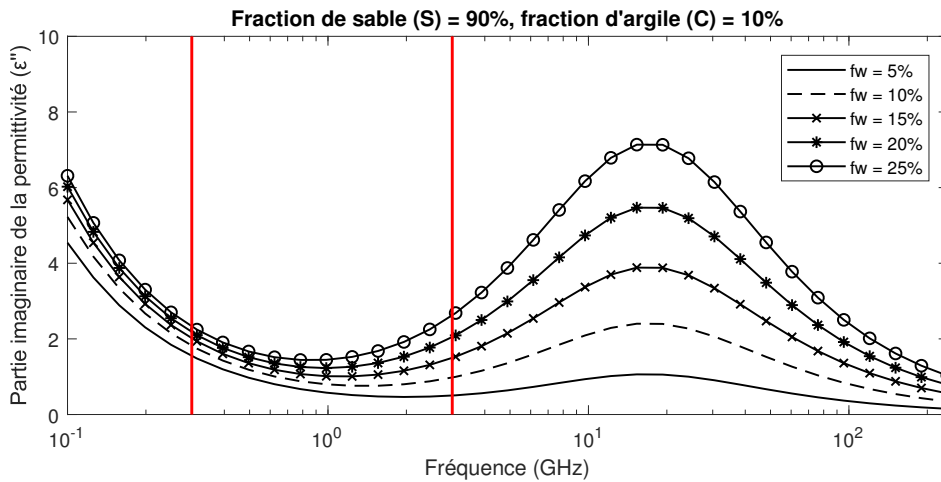
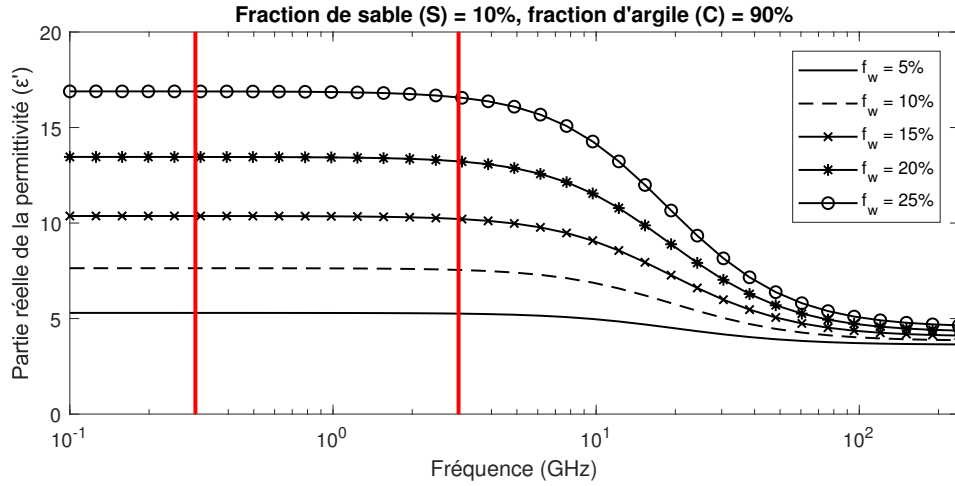
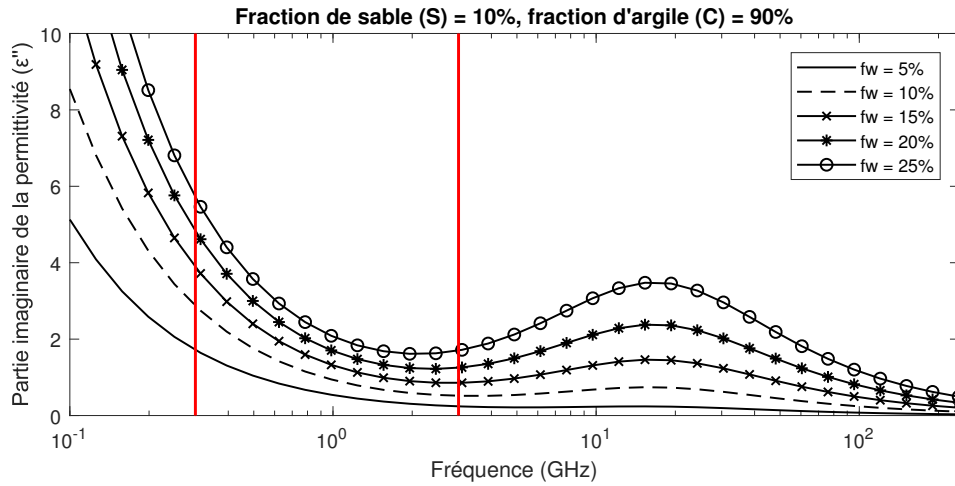


FIGURE 3.23 – La partie imaginaire de la permittivité diélectrique calculée par le modèle de Peplinski pour un sol avec les propriétés suivantes : $S = 0,9$, $C = 0,1$, $\rho_a = 2 \text{ g/cm}^3$ et $\rho_s = 2,66 \text{ g/cm}^3$ et $f_w = 5\% - 25\%$ avec un pas de 5%. La plage de fréquence de notre application GPR pour la détection des racines est délimitée par les deux traits en rouge.


 FIGURE 3.24 – Similaire à la figure 3.22 avec $S = 0,1$ et $C = 0,9$.

 FIGURE 3.25 – Similaire à la figure 3.23 avec $S = 0,1$ et $C = 0,9$.

notre application GPR [0,3 – 3,3 GHz] et augmente lorsque la fraction volumique d'eau augmente. D'autre part, l'augmentation de la fraction d'argile (figure 3.24) résulte en une diminution de la partie réelle de permittivité, ce qui signifie une augmentation de la vitesse des ondes EM (v).

Au début, ce constat ne semble pas être en bon accord avec l'expérience générale qui prévoit de faibles vitesses dans les environnements argileux. Ce résultat particulier pourrait être facilement expliqué du fait que les sols argileux (en raison de la haute porosité des argiles) ont généralement une teneur en eau importante qui se traduit par la diminution de leur vitesse globale. D'autre part, l'argile sèche possède une partie réelle de permittivité égale ou même plus petite qu'un sable sec [Daniels, 2005]. En outre, en raison de la porosité élevée des argiles, les argiles sèches pourraient avoir une fraction d'air importante qui contribue à l'augmentation globale de leur vitesse.

L'équation de la partie imaginaire de la permittivité diélectrique (3.30) se compose de deux parties : la première est liée au terme conducteur et la deuxième est liée à la relaxation de Debye due à la teneur en eau. On peut noter les deux conclusions suivantes :

- L'augmentation de la fraction volumique de l'eau (f_w) entraîne une augmentation de la partie imaginaire (c'est-à-dire l'atténuation) et augmente également la contribution de la relaxation de Debye.
- L'augmentation de la fraction d'argile (C) rend les pertes EM principalement liées au terme conducteur (3.35 et 3.36) et diminue les effets de la relaxation de Debye dans la gamme de fréquences GPR utilisée pour la détection des racines [0,3 – 3,3 GHz].

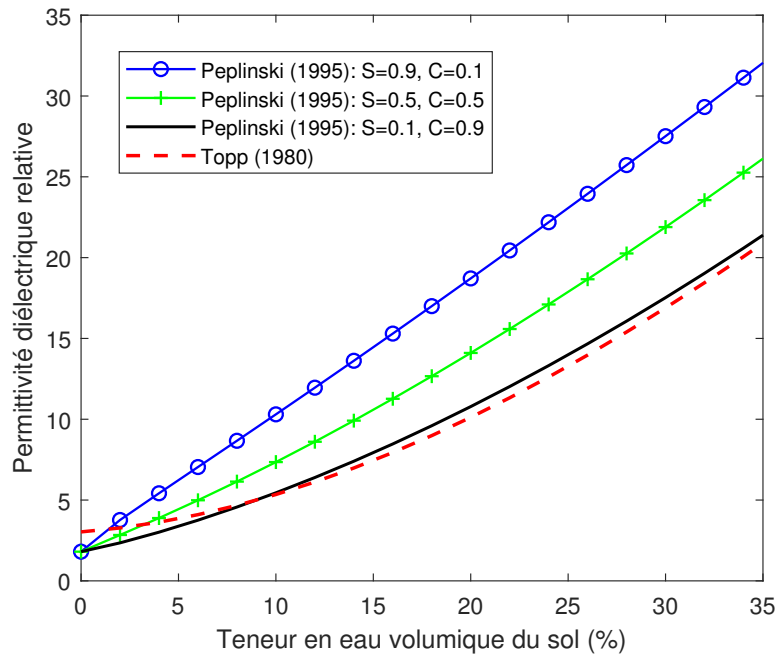


FIGURE 3.26 – La permittivité relative du sol calculée pour la fréquence 900 MHz utilisant le modèle de Peplinski et al. [1995] et de Topp et al. [1980]. Les propriétés du sol sont : $\rho_a = 1 \text{ g/cm}^3$ et $\rho_s = 2,66 \text{ g/cm}^3$.

La figure 3.26 illustre une comparaison entre la permittivité relative (partie réelle) calculée en utilisant le modèle de Peplinski et al. [1995] et celui suggéré par Topp et al. [1980]. Les propriétés du sol considérées dans le modèle de Peplinski sont les suivantes : $\rho_a = 1 \text{ g/cm}^3$ et $\rho_s = 2,66 \text{ g/cm}^3$. Pour la courbe en noir, il s'agit d'un sable argileux ($S = 0,1$ et $C = 0,9$) et on constate que le modèle de permittivité est en bon accord avec celui de Topp et al. [1980] pour ce type de sols. Toutefois, plus la fraction de sable (S) augmente, plus l'écart entre les deux modèles devient plus important (courbes vertes et bleue avec marqueurs). En effet, pour les sols sableux, le modèle semi-empirique a tendance à surestimer la permittivité réelle par rapport au modèle de Topp et al. [1980].

Bien qu'elle soit populaire, l'approche suggérée par Topp et al. [1980] est indépendante de la structure du sol, ce qui n'est pas en bon accord avec les mesures expérimentales qui indiquent le contraire [Dobson et al., 1984]. Cela signifie que la dépendance de la méthode semi-empirique à la structure du sol, bien qu'elle ne soit pas en bon accord avec le modèle de Topp et al. [1980], reste toujours une conclusion rationnelle étayée par des preuves expérimentales. Toutefois, l'augmentation de la fraction de sable (S) dans le modèle de Peplinski résulte en une relation linéaire entre la permittivité du sol et sa teneur en eau (courbe bleue avec marqueurs en cercle). Ceci représente l'inconvénient du modèle de Peplinski, étant donné que les mesures expérimentales ne montrent pas ce type de linéarité avec la teneur en eau [Dobson et al., 1984].

Néanmoins, le modèle de Peplinski est particulièrement intéressant pour les applications hautes fréquences. Il sera donc utilisé le cadre de cette thèse pour les raisons suivantes :

- Le modèle lie la permittivité du sol à des propriétés traditionnellement utilisées.
- Ces propriétés permettent, à travers ce modèle, de définir à la fois la partie réelle et imaginaire de la permittivité diélectrique du sol.
- Le modèle de Peplinski est en bon accord avec les mesures expérimentales pour une large gamme de fréquences. [Peplinski et al., 1995].
- Pour notre gamme de fréquences d'intérêt, les équations du modèle (3.28 - 3.36) peuvent être approximées en utilisant un modèle de Debye uni-pôle, ce qui rend l'implémentation du modèle de Peplinski efficace et directe.

3.4.3 Modèle géométrique du sol

Les sols naturels sont hétérogènes en raison des propriétés du matériau de la roche mère et des processus de formation du sol [Rossi et al., 2007]. En conséquence, les sols se composent d'inclusions de différents matériaux dont les tailles et les propriétés EM varient sur une large gamme. En revanche, pour étudier le système racinaire, les hautes fréquences GPR sont souvent utilisées en raison de la haute résolution recherchée. Cependant, en augmentant la fréquence de fonctionnement, le GPR devient plus sensible à l'hétérogénéité naturelle du sol [Takahashi et al., 2013], ce qui entraîne des réflexions indésirables (*clutter*) qui dégradent la qualité des données.

Afin de modéliser cette composition hétérogène du sol dans des simulations GPR plus réalistes, le logiciel gprMax nous propose un modèle basé sur la théorie des fractales [Turcotte, 1997]. Ce modèle géométrique peut être couplé au modèle diélectrique de Peplinski que nous venons de décrire dans la sous-section précédente. De notre côté, nous avons proposé un modèle qui repose sur l'introduction d'un nombre d'inclusions distribuées selon une loi normale pour définir un sol hétérogène. Testé sous gprMax, notre modèle semble produire des simulations plus rapides que celles faisant appel aux fractales. Néanmoins, les deux modèles proposent deux approches différentes de voir l'hétérogénéité d'un sol.

3.4.3.1 Modèle des fractales

Les fractales sont des fonctions invariantes d'échelle ou auto-similaires⁴ qui peuvent exprimer la topographie de la terre avec suffisamment de détails [Turcotte, 1997]. En outre, Huang and Turcotte [1989] ont rapporté que les propriétés environnementales liées au sol obéissent souvent aux lois fractales. Pour modéliser une structure avec des propriétés fractales, il faut faire appel à un bruit fractal gaussien qui peut être généré en appliquant le processus suivant :

Modèle fractal

1. On considère une grille $N \times N$ contenant N^2 points également espacés. À chaque point est associée une valeur aléatoire selon la distribution gaussienne définie dans (3.37). On note ces points de données h_{nm} , où n et m désignent la position selon la direction x et y , respectivement.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3.37)$$

2. On applique une Transformée de Fourier Discrète (TFD) bidimensionnelle à l'ensemble des données h_{nm} ; ce qui résulte en une matrice $H(N \times N)$ de coefficients complexes.
3. Une nouvelle matrice $H^*(N \times N)$ de coefficients complexes est obtenue par l'équation :

$$H^* = H / k_r^{\frac{\beta}{2}} \quad (3.38)$$

avec k_r le nombre d'onde radial et β un coefficient réel linéairement lié à la dimension fractale D par la relation :

$$D = \frac{7-\beta}{2} \quad (3.39)$$

4. On prend la Transformée de Fourier Discrète Inverse (TFDI) de la matrice H^* .

Ainsi, différentes distributions hétérogènes du sol peuvent être générées selon la valeur de la dimension fractale choisie (voir figure 3.27). En effet, ce paramètre permet de contrôler la répartition stochastique des matériaux (de nombre N) au sein du volume considéré dans la simulation. Pour un parallépipède orthogonal, la dimension fractale prend des valeurs entre 0 et 3.

4. L'auto-similarité est le caractère d'un objet dans lequel on peut trouver des similarités en l'observant à différentes échelles.

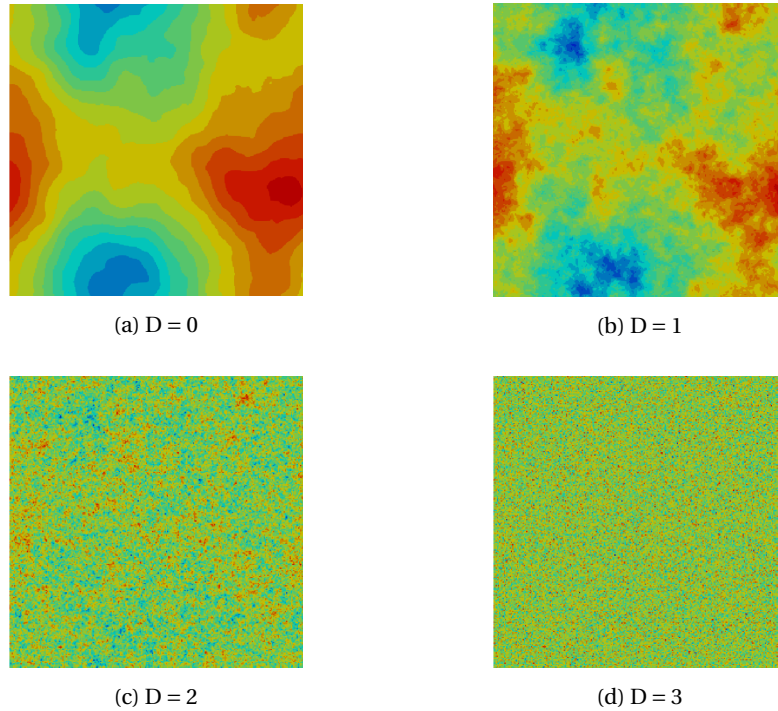


FIGURE 3.27 – Fractales bidimensionnelles pour différentes dimensions fractales D .

La commande des fractales sur gprMax permet de spécifier les dimensions du parallélépipède modélisant le sol hétérogène ainsi que le nombre de matériaux qui le composent. Pour définir les propriétés diélectriques des matériaux (ϵ_r et σ), il suffit de renseigner la plage de la teneur en eau [min - max] et les fractions de sable et d'argile pour que gprMax fasse appel au modèle de Peplinski permettant ainsi de définir les paramètres EM des matériaux mis en jeu. La commande permet en plus de spécifier le poids des fractales dans chaque direction du repère (x , y et z). Notons enfin que les fractales peuvent être aussi utilisées pour générer la rugosité des surfaces sur gprMax.

3.4.3.2 Modèle des inclusions

Une autre façon de modéliser le problème consiste à considérer l'hétérogénéité comme un nombre d'inclusions distribuées aléatoirement au sein d'un sol. Sur la base de ce principe, nous proposons un processus qui permet de générer un tel sol hétérogène :

Modèle proposé

1. On commence d'abord par définir un sol homogène (avec ϵ_r et σ constantes).
2. Le sol est ensuite stratifié en n couches. Un certain nombre d'inclusions (N_k) est introduit dans la $k^{\text{ème}}$ couche. Les inclusions sont sous forme de petites sphères ayant un diamètre de l'ordre de $\left[\frac{d_{\min}}{20} - \frac{d_{\min}}{5} \right]$ avec d_{\min} le plus petit diamètre de la racine modélisée.
3. Les caractéristiques spatiales (tailles et positions) et EM (ϵ_r et σ) des inclusions suivent toutes une distribution normale (définie dans (3.37)). Les valeurs limites de permittivité pour une plage de teneur en eau déterminée, peuvent être calculées à base du modèle de Topp et al. [1980], par exemple.
4. Pour prendre en compte la rugosité de la surface, une couche supplémentaire C_1 de quelques centimètres d'épaisseur est rajoutée, où l'on introduit des inclusions possédant les caractéristiques de l'air (des trous).

Un code MATLAB permettant de générer un sol hétérogène selon ce modèle et l'inclure dans le simulateur gprMax est fourni en Annexe B.

3.4.3.3 Analyse des deux modèles de sol hétérogène

Les deux modèles représentent deux approches différentes pour modéliser un sol hétérogène. En effet, le modèle fractal aboutit à un continuum de matériaux hétérogènes qui constituent la globalité du sol, alors que le modèle proposé ne considère en réalité qu'un sol homogène contenant un certain nombre d'inclusions qui représentent son hétérogénéité. Pour illustrer, la figure 3.28 montre un environnement incluant une racine ($d = 2\text{ cm}$, $\theta_g = 150\%$) et faisant appel à un sol hétérogène selon le modèle des inclusions proposé (à gauche) et le modèle fractal (à droite).

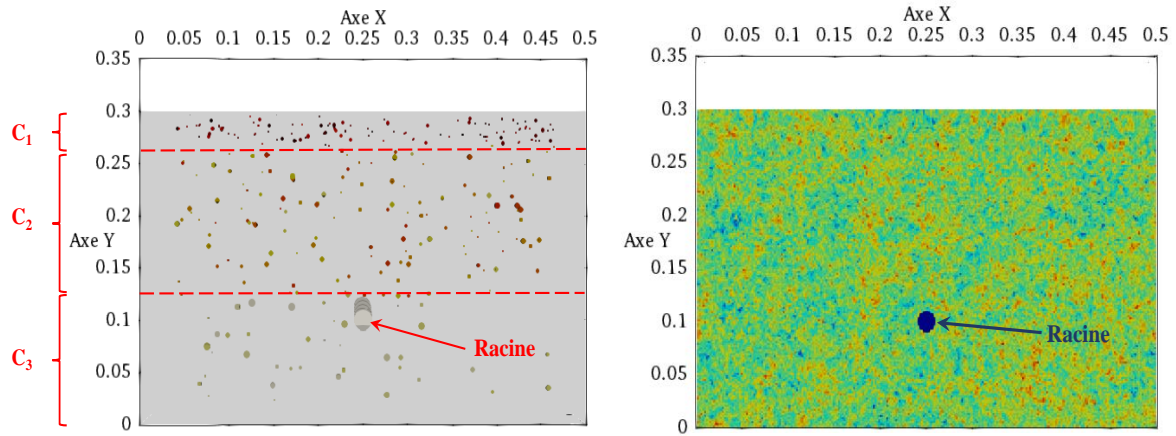


FIGURE 3.28 – Exemples de sols hétérogènes générés par les deux modèles : (à gauche) le modèle proposé : couche 1 : $N_1 = 200$; $\theta_v = [0 - 10\%]$; couche 2 : $N_2 = 150$; $\theta_v = [0 - 8\%]$; couche 3 : $N_3 = 100$; $\theta_v = [0 - 6\%]$, et (à droite) le modèle fractal : $N = 100$ matériaux, $D = 2$; $S = 0,9$; $C = 0,1$; $\theta_v = [0 - 10\%]$; $\rho_a = 2\text{ g/cm}^3$; $\rho_s = 2,66\text{ g/cm}^3$.

Dans la figure 3.29 nous pouvons observer les profils GPR bruts (sans aucun traitement) qui résultent de la simulation utilisant ces deux modèles. D'après la comparaison fournie dans le tableau 3.3, nous pouvons noter qu'une simulation incluant un sol hétérogène selon le modèle proposé est plus rapide que celle faisant appel au modèle fractal combiné avec le modèle diélectrique de Peplinski. Cela peut-être expliqué par le fait que la dispersion du sol dans le modèle de Peplinski est simulée par un modèle de Debye uni-pôle qui nécessite de mettre à jour des coefficients supplémentaires, et donc des variables mémoires supplémentaires à chaque point de la grille FDTD. Ce qui augmente la demande en mémoire et ralentit la simulation.

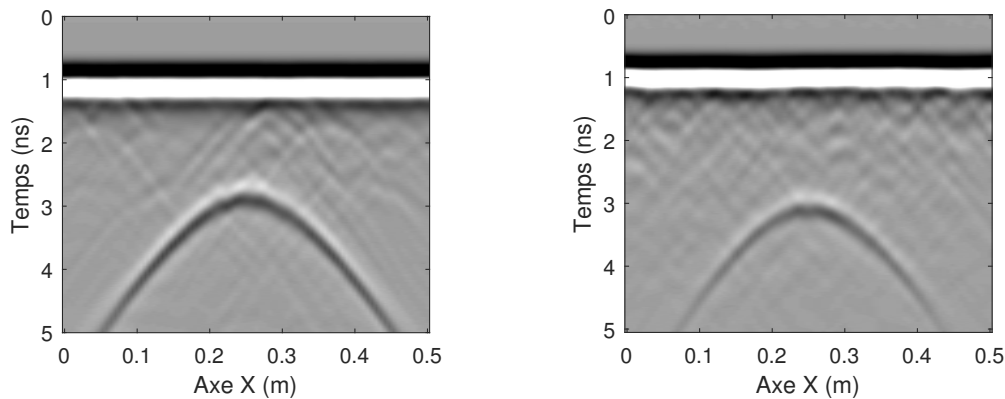


FIGURE 3.29 – B-scans résultants de la simulation gprMax en utilisant : le modèle proposé (à gauche), le modèle fractal (à droite).

TABLEAU 3.3 – Temps nécessaires à la simulation gprMax faisant appel aux deux modèles de sol hétérogène. Calculs effectués sur un ordinateur équipé d'un processeur Intel Xeon 3,80 GHz et d'une RAM de 64 Go.

Dimensions de l'environnement	Maillage FDTD	Temps nécessaires pour un A-scan	
		Modèle proposé	Modèle fractal
0,5 x 0,35 x 0,1 m	1 mm	13 min 30 s	20 min 34 s
	2 mm	1 min 09 s	1 min 34 s

Enfin, pour modéliser les sols hétérogènes dans le cadre de cette thèse, nous allons utiliser le modèle fractal étant donné qu'il aboutit à des environnements plus réalistes.

3.5 Conclusion

En ce chapitre, nous avons présenté un ensemble de modèles capable de simuler le système sol-racines avec des variables d'entrée adaptées au simulateur gprMax utilisé dans cette thèse. Grâce à ces modèles, nous avons pu comprendre et évaluer l'impact des facteurs qui limitent la détection des racines par GPR comme le diamètre de la racine, sa teneur en eau et son orientation, ou encore la composition du sol et son hétérogénéité.

Maintenant que ces modèles sont décrits et analysés, nous sommes en mesure de simuler - dans la suite de ce travail -, la présence des systèmes racinaires dans des environnements avec des propriétés géométriques et diélectriques réalistes. De plus, et à la lumière des facteurs déterminants dans l'utilisation du GPR pour détecter les racines, nous verrons comment il est possible d'exploiter les données GPR pour passer de la simple détection à la reconstruction tridimensionnelle de l'architecture racinaire.

Du point de vue expérimental, le travail présenté dans de ce chapitre servira à guider les mesures GPR au laboratoire. Il sera également utile sur le terrain pour prédire la précision de la détection et de la quantification du système racinaire par GPR en fonction des conditions spécifiques du sol et des racines.

Bibliographie

- Aboudourib, A., Serhir, M. and Lesselier, D. [2019]. 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, p. 8739825. [69](#)
- Al Hagrey, S. [2007]. Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity, *Journal of Experimental Botany* **58**(4) : 839–854. [65](#)
- Berntson, G. M. [1997]. Topological scaling and plant root system architecture : developmental and functional hierarchies, *The New Phytologist* **135**(4) : 621–634. [72](#)
- Berry, S. L. and Roderick, M. L. [2005]. Plant–water relations and the fibre saturation point, *New Phytologist* **168**(1) : 25–37. [64](#)
- Bouma, T., Nielsen, K. L., Van Hal, J. and Koutstaal, B. [2001]. Root system topology and diameter distribution of species from habitats differing in inundation frequency, *Functional Ecology* **15**(3) : 360–369. [72](#)
- Butnor, J. R., Doolittle, J., Johnsen, K. H., Samuelson, L., Stokes, T. and Kress, L. [2003]. Utility of ground-penetrating radar as a root biomass survey tool in forest systems, *Soil Science Society of America Journal* **67**(5) : 1607–1615. [70](#)
- Cassidy, N. J. [2009]. Ground penetrating radar data processing, modelling and analysis, in H. M. Jol (ed.), *Ground Penetrating Radar : Theory and Applications*, Elsevier, pp. 141–176. [83](#)
- 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. [83](#)
- Daniels, D. J. [2005]. Ground Penetrating Radar, in K. Chang (ed.), *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*, Wiley Online Library. [85](#)
- Debye, P. J. W. [1929]. *Polare Molekeln*, Leipzig Hirzel. [82](#)
- Dobson, M. C., Kouyate, F. and Ulaby, F. T. [1984]. A reexamination of soil textural effects on microwave emission and backscattering, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **33**(6) : 530–536. [86](#)
- Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Hallikainen, M. T. and El-Rayes, M. A. [1985]. Microwave dielectric behavior of wet soil-part ii : dielectric mixing models, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **33**(1) : 35–46. [83](#)
- Eloy, C. [2011]. Leonardo's rule, self-similarity, and wind-induced stresses in trees, *Physical Review Letters* **107**(25) : 258101. [73](#)
- Fitter, A. [1987]. An architectural approach to the comparative ecology of plant root systems, *New Phytologist* **106** : 61–77. [72](#)
- Gee, G. W. and Or, D. [2002]. 2.4 Particle-size analysis, *Methods of soil analysis : Part 4 physical methods* **5** : 255–293. [ix](#), [79](#)
- Glass, S. V. and Zelinka, S. L. [2010]. Moisture relations and physical properties of wood, *Wood handbook : wood as an engineering material : chapter 4. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Madison, S Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory* **190** : 4.1–4.19. [68](#), [69](#)
- Grabosky, J., Haffner, E., Bassuk, N. et al. [2009]. Plant available moisture in stone-soil media for use under pavement while allowing urban tree root growth, *Journal of Arboriculture* **35**(5) : 271. [78](#)

- Groenendyk, D. G., Ferré, T. P., Thorp, K. R. and Rice, A. K. [2015]. Hydrologic-process-based soil texture classifications for improved visualization of landscape function, *PLoS One* **10**(6) : e0131299. [ix](#), [79](#)
- 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. [ix](#), [66](#), [67](#)
- Guo, L., Wu, Y., Chen, J., Hirano, Y., Tanikawa, T., Li, W. and Cui, X. [2015]. Calibrating the impact of root orientation on root quantification using ground-penetrating radar, *Plant and Soil* **395**(1-2) : 289–305. [75](#)
- Hirano, Y., Dannoura, M., Aono, K., Igarashi, T., Ishii, M., Yamase, K., Makita, N. and Kanazawa, Y. [2009]. Limiting factors in the detection of tree roots using ground-penetrating radar, *Plant and Soil* **319**(1-2) : 15. [ix](#), [69](#), [71](#)
- Hirano, Y., Yamamoto, R., Dannoura, M., Aono, K., Igarashi, T., Ishii, M., Yamase, K., Makita, N. and Kanazawa, Y. [2012]. Detection frequency of pinus thunbergii roots by ground-penetrating radar is related to root biomass, *Plant and Soil* **360**(1-2) : 363–373. [ix](#), [66](#), [67](#)
- Huang, J. and Turcotte, D. [1989]. Fractal mapping of digitized images : application to the topography of arizona and comparisons with synthetic images, *Journal of Geophysical Research : Solid Earth* **94**(B6) : 7491–7495. [87](#)
- Klein, L. and Swift, C. [1977]. An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **25**(1) : 104–111. [83](#)
- Koledintseva, M. Y., Wu, J., Zhang, H., Drewniak, J. L. and Rozanov, K. N. [2004]. Representation of permittivity for multiphase dielectric mixtures in fdtd modeling, *2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (IEEE Cat. No. 04CH37559)*, Silicon Valley, Vol. 1, IEEE, pp. 309–314. [66](#)
- Liu, Q., Cui, X., Liu, X., Chen, J., Chen, X. and Cao, X. [2018]. Detection of root orientation using ground-penetrating radar, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **56**(1) : 93–104. [ix](#), [76](#)
- Mandelbrot, B. B. [1978]. The fractal geometry of trees and other natural phenomena, *Geometrical probability and biological structures : Buffon's 200th anniversary*, Springer, pp. 235–249. [73](#)
- McKenzie, N., Jacquier, D., Isbell, R. and Brown, K. [2004]. *Australian soils and landscapes : an illustrated compendium*, CSIRO Publishing. [80](#)
- Nawaz, M. F., Bourrie, G. and Trolard, F. [2013]. Soil compaction impact and modelling. A review, *Agronomy for sustainable development* **33**(2) : 291–309. [xiii](#), [80](#)
- Oppelt, A. L., Kurth, W. and Godbold, D. L. [2001]. Topology, scaling relations and leonardo's rule in root systems from african tree species, *Tree Physiology* **21**(2-3) : 117–128. [ix](#), [73](#), [74](#)
- Paz, A., Thorin, E. and Topp, C. [2011]. Dielectric mixing models for water content determination in woody biomass, *Wood Science and Technology* **45**(2) : 249–259. [66](#)
- Peplinski, N. R., Ulaby, F. T. and Dobson, M. C. [1995]. Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3 GHz range, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **33**(3) : 803–807. [x](#), [83](#), [86](#)
- Richter, J. P. et al. [1970]. *The notebooks of Leonardo da Vinci*, Vol. 2, Courier Corporation. [73](#)
- Rossi, M., Lehmann, P., Ursino, N., Ippisch, O. and Flühler, H. [2007]. Solute mixing during imbibition and drainage in a macroscopically heterogeneous medium, *Water Resources Research* **43**(4). [87](#)

- Saint Cast, C. [2019]. *Modélisation du Développement Architectural, de l'Acclimatation au Vent Dominant et de l'Ancrage du Système Racinaire du Pin Maritime*, PhD thesis, Université de Bordeaux, France. 72
- Straube, J., Onysko, D. and Schumacher, C. [2002]. Methodology and design of field experiments for monitoring the hygrothermal performance of wood frame enclosures, *Journal of Thermal Envelope and Building Science* **26**(2) : 123–151. 68
- Takahashi, K., Igel, J., Preetz, H. and Sato, M. [2013]. Influence of heterogeneous soils and clutter on the performance of ground-penetrating radar for landmine detection, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing* **52**(6) : 3464–3472. 87
- Tanikawa, T., Dannoura, M., Yamase, K., Ikeno, H. and Hirano, Y. [2014]. Reply to :“comment on root orientation can affect detection accuracy of ground-penetrating radar”, *Plant and Soil* **380**(1-2) : 445–450. 75
- Tanikawa, T., Hirano, Y., Dannoura, M., Yamase, K., Aono, K., Ishii, M., Igarashi, T., Ikeno, H. and Kanazawa, Y. [2013]. Root orientation can affect detection accuracy of ground-penetrating radar, *Plant and Soil* **373**(1-2) : 317–327. 74, 75
- Topp, G. C., Davis, J. L. and Annan, A. P. [1980]. Electromagnetic determination of soil water content : measurements in coaxial transmission lines, *Water Resources Research* **16**(3) : 574–582. ix, x, 81, 82, 86, 88
- Tran, A. P., Ardekani, M. R. M. and Lambot, S. [2012]. Coupling of dielectric mixing models with full-wave ground-penetrating radar signal inversion for sandy-soil-moisture estimation, *Geophysics* **77**(3) : H33–H44. 83
- Turcotte, D. L. [1997]. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*, Cambridge University Press. 87
- van Noordwijk, M., Spek, L. Y. and de Willigen, P. [1994]. Proximal root diameter as predictor of total root size for fractal branching models, *Plant and Soil* **164**(1) : 107–117. 74
- Walker, R., Hofstee, C., Dane, J. and Hill, W. [1998]. Surfactant enhanced removal of pce in a partially saturated, stratified porous medium, *Journal of Contaminant Hydrology* **34**(1-2) : 31–46. 78
- Wharton, R. P., Hazen, G. A., Rau, R. N., Best, D. L. et al. [1980]. Advancements in electromagnetic propagation logging, *SPE Rocky Mountain Regional Meeting*, Society of Petroleum Engineers. 81
- Williams, G. and Watts, D. C. [1970]. Non-symmetrical dielectric relaxation behaviour arising from a simple empirical decay function, *Transactions of the Faraday Society* **66** : 80–85. 83

Chapitre 4

Traitement des données GPR pour la reconstruction tridimensionnelle des architectures racinaires

« S'il fallait un jour que les forêts disparaissent, l'homme n'aurait plus que son arbre généalogique pour pleurer. »

Albert Einstein

Sommaire

4.1 Introduction	96
4.2 Pré-traitement des données	96
4.2.1 Correction du temps zéro	97
4.2.2 Gain temporel	97
4.3 Techniques de réduction du clutter	99
4.3.1 Soustraction de la moyenne/médiane	100
4.3.2 Décomposition en valeurs singulières	101
4.4 Estimation de la permittivité relative du sol	104
4.4.1 Détection des bords par l'opérateur de Canny	106
4.4.2 Approche de la transformée de Hough aléatoire (RHT)	107
4.5 Migration des données	110
4.5.1 Migration SAR basée sur le filtrage adapté	110
4.5.2 Transformée d'Hilbert	114
4.6 Validation de la chaîne de post-traitement sur des données synthétiques	115
4.6.1 Modèles racinaires considérés	115
4.6.2 Résultats du traitement	117
4.6.3 Effet de l'hétérogénéité du sol	119
4.7 Conclusion	120

4.1 Introduction

La reconstruction tridimensionnelle de l'architecture racinaire permet une visualisation directe de l'évolution spatio-temporelle des racines sur le terrain. Dans ce chapitre, sont présentés les techniques de traitement de données GPR permettant de reconstruire l'architecture racinaire dans ses trois dimensions. Tout d'abord, le pré-traitement des données est indispensable pour pouvoir appliquer des méthodes de reconstruction efficaces. Ensuite, les techniques de réduction de clutter doivent permettre d'augmenter le rapport signal à bruit des réflexions d'intérêt. Dans ce sens, nous proposons des techniques de réduction de clutter qui seront testées sur des données de simulation impliquant des sols hétérogènes.

Par la suite, une approche basée sur la transformée de Hough aléatoire est proposée. Elle permet d'une part de déterminer la position géométrique (horizontale et verticale) de la racine, et d'autre part d'estimer la permittivité relative du sol prospecté. Sachant que les techniques de migration (étape ultérieure) nécessitent la connaissance de la permittivité du sol, la méthode proposée sera particulièrement utile dans le cas des sols hétérogènes dont la détermination des propriétés diélectriques représente un vrai défi.

Dans la dernière partie de la chaîne de traitement proposée, un algorithme de migration de type SAR est adopté. Ce dernier repose sur la technique du filtrage adapté combinée avec la transformée d'Hilbert. Cette méthode de rétro-propagation a montré son efficacité dans la focalisation des réflexions hyperboliques tout en optimisant le rapport signal à bruit du radargramme. Finalement, la chaîne proposée est validée sur des données synthétiques incluant les modèles réalistes de sol et de racines, précédemment introduits dans le chapitre 3. Une validation sur des données de mesures expérimentales sera également proposée dans le chapitre 5.

4.2 Pré-traitement des données

Afin d'illustrer l'effet des techniques du pré-traitement proposées, une simulation adoptant le scénario présenté dans la figure 4.1 a été considérée. L'environnement simulé contient trois modèles de racines de même diamètre et teneur en eau ($d = 2$ cm, $\theta_g = 50\%$) à différentes profondeurs ($p_1 = 0,09$ m, $p_2 = 0,13$ m et $p_3 = 0,17$ m). De plus, nous considérons un sol hétérogène modélisé par les fractales avec les paramètres suivants : $N = 100$ matériaux, $D = 2$; $S = 0,9$; $C = 0,1$; $\theta_v = [0 - 8\%]$; $\rho_a = 2$ g/cm³; $\rho_s = 2,66$ g/cm³. Pour l'antenne d'émission, il s'agit d'un dipôle hertzien qui rayonne à une fréquence centrale de 1 GHz.

Pour assurer la stabilité numérique de la méthode FDTD, la discrétisation spatiale est fixée à 2 mm. Par conséquent, le pas de discrétisation temporelle (intervalle de temps entre les échantillons d'un A-scan) est calculé par la condition CFL à 5,77 ps. La forme d'onde du courant d'excitation est un monopulse gaussien. La fenêtre temporelle est fixée à 10 ns et la séparation entre l'émetteur et le récepteur à 10 cm. Le pas de déplacement des antennes et la distance entre les antennes et le

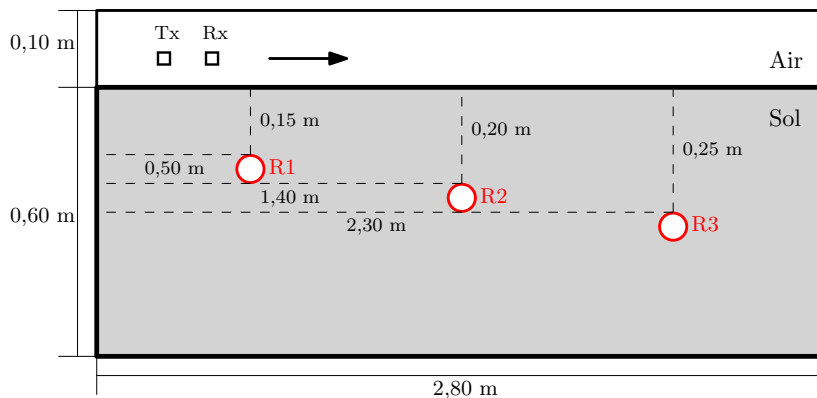


FIGURE 4.1 – Scénario considéré pour la démonstration.

sol ont été fixés respectivement à 2 cm et 5 cm. De plus, une condition aux limites ([Perfectly Matched Layer \(PML\)](#)) est appliquée à tous les côtés du domaine pour atténuer l'impact des réflexions introduites par les bords.

La figure 4.2 correspond au B-scan brut obtenu après simulation du scénario de la figure 4.1 sur gprMax en mode offset commun. Notons que tout au long de ce chapitre, les illustrations se feront en mode 2-D. En revanche, la validation de la chaîne de traitement à la fin du chapitre se fera en mode 3-D.

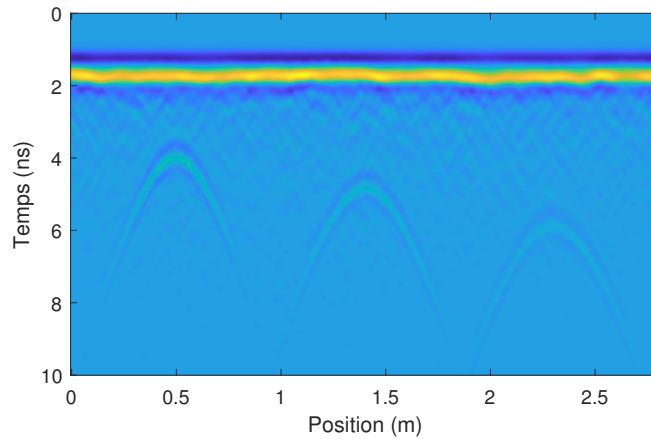


FIGURE 4.2 – B-scan brut de démonstration issu de la simulation du scénario de la figure 4.1.

4.2.1 Correction du temps zéro

Le temps zéro peut ne pas être détecté avec précision par le système GPR sur le terrain et doit donc être corrigé pour garantir des profondeurs correctes sur le profil GPR. Cette procédure est particulièrement importante dans le cas des cibles susceptibles d'être proches de la surface, comme les racines d'arbres. En effet, un décalage du temps zéro peut se produire en raison d'une mauvaise calibration des instruments électroniques par exemple. Une température instable du système ou des longueurs de câbles de connexion différentes peuvent aussi causer un désalignement des A-scans le long de la direction de mesure. Pour cela, il est nécessaire de définir un niveau de référence afin de déplacer tous les A-scans à la même position temporelle. Différents niveaux de référence ont été déclarés comme efficaces dans la littérature [[Benedetto et al., 2017](#)] :

- le premier changement dans la forme d'onde (c'est-à-dire l'instant où le signal commence l'oscillation) ;
- le premier pic positif ou négatif ;
- le point d'amplitude nulle entre les premiers pics positif et négatif ;
- le point d'amplitude moyenne entre les premiers pics positif et négatif.

Chacune de ces méthodes présente avantages et inconvénients. Cependant, [[Yelf, 2004](#)] a démontré que le temps zéro dépend aussi des propriétés diélectriques des matériaux de la surface sous les antennes et de la fréquence centrale du système. Dans ce travail, nous avons choisi de considérer la méthode du premier pic (positif ou négatif) comme il est facilement détectable. La figure 4.3 montre l'effet de la correction du temps zéro sur l'exemple de B-scan brut de la figure 4.2.

4.2.2 Gain temporel

Le gain temporel est une technique utilisée pour compenser la décroissance d'amplitude avec la profondeur dans les profils GPR. En effet, les signaux arrivant en premier et contenant la réflexion directe des antennes possèdent une amplitude plus forte que celle des signaux réfléchis par les cibles en raison de l'atténuation des ondes EM. Ces pertes sont causées essentiellement

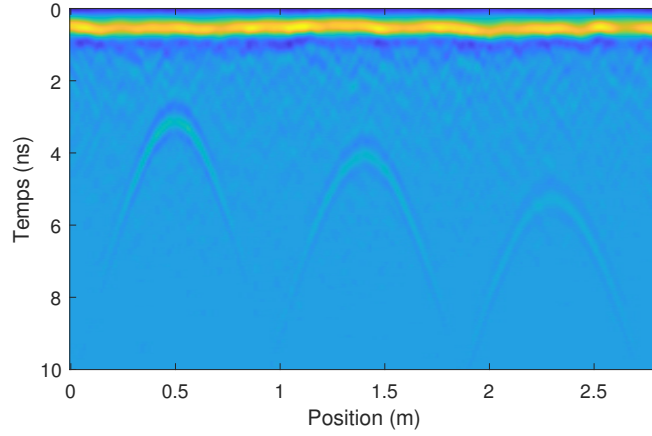


FIGURE 4.3 – Application de la correction du temps zéro au B-scan de la figure 4.2.

par l'atténuation intrinsèque des matériaux du sol prospecté. Aussi, cette technique devient très pratique voire indispensable lorsque les mesures se font sur la surface d'un sol saturé. Les principales fonctions de gain temporel rencontrées dans la littérature appliquent un gain linéaire ou exponentiel pour compenser l'atténuation du profil GPR.

Parmi les méthodes qui existent pour déterminer le coefficient d'atténuation dans un profil GPR, on trouve la méthode de décroissance d'amplitude inverse (Inverse Amplitude Decay (IAD)). Si l'on note x_k les A-scans collectés à partir de N positions d'observation sur un intervalle de temps de M instants, alors la matrice X de taille $M \times N$ correspondant au B-scan brut collecté par le système GPR peut s'écrire comme suit :

$$X = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t), \dots, x_m(t)] \quad (4.1)$$

La méthode IAD consiste à calculer d'abord la transformée d'Hilbert de chaque A-scan x_k comme suit :

$$\hat{x}_k(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x_k(\tau)}{t - \tau} d\tau = \frac{1}{\pi t} * x_k(t) \quad (4.2)$$

où le symbole '*' désigne l'opération de convolution. Selon la transformée d'Hilbert, le signal analytique z_k correspondant au A-scan x_k peut être défini comme suit :

$$z_k(t) = x_k(t) + j\hat{x}_k(t) \quad (4.3)$$

qui peut aussi s'écrire :

$$z_k(t) = A(t) \exp[j\phi(t)] \quad (4.4)$$

avec :

$$A(t) = \sqrt{x_k^2 + \hat{x}_k^2} \quad \text{et} : \quad \phi(t) = \arctan\left(\frac{\hat{x}_k}{x_k}\right) \quad (4.5)$$

où $A(t)$ désigne l'amplitude instantanée (ou l'enveloppe) et $\phi(t)$ la phase instantanée (la fréquence instantanée peut être obtenue par : $\omega = \frac{d\phi(t)}{dt}$).

Pour déterminer le coefficient d'atténuation d'un B-scan, l'amplitude instantanée moyenne de tous les A-scans est calculée comme illustré dans la figure 4.4. Une fonction exponentielle $a(t)$ est ensuite estimée à travers l'enveloppe moyenne (en pointillés). L'inverse de cette fonction $1/a(t)$ est alors utilisé pour compenser l'atténuation dans le profil GPR. La figure 4.5 montre l'effet de l'application de cette technique pour compenser les atténuations dans le B-scan de la figure 4.2.

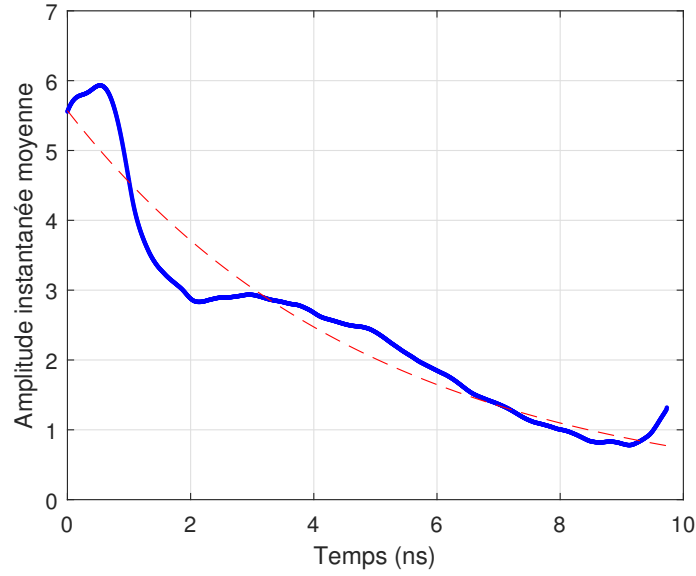


FIGURE 4.4 – La ligne continue représente l’amplitude instantanée moyenne de l’ensemble des A-scans du scénario de démonstration. La ligne en pointillés est la fonction d’atténuation exponentielle estimée.

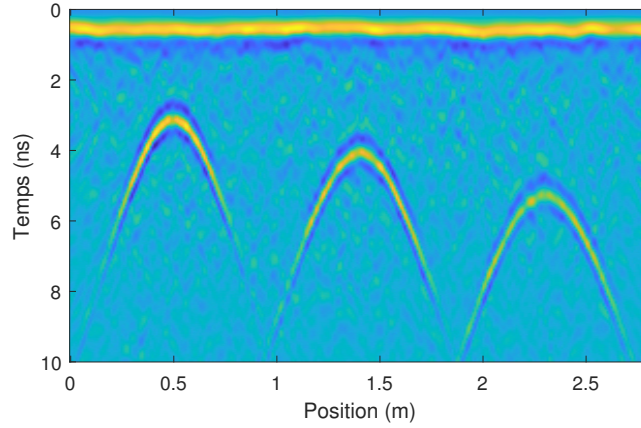


FIGURE 4.5 – Application du gain exponentiel estimé par la méthode de la décroissance d’amplitude inverse.

Pour éviter des fausses interprétations de données, la compensation du gain ne doit pas amplifier la contribution du bruit et des signaux indésirables. Ce traitement est donc plus efficace s’il est effectué après la réduction du clutter.

4.3 Techniques de réduction du clutter

De nombreuses études sur le terrain ont montré que si pour la plupart des types de sol, le GPR peut atteindre le niveau de détectabilité souhaitable, une réduction du taux de fausses alarmes (ou *False Alarm Rate (FAR)*) reste la tâche la plus importante pour les développeurs des systèmes GPR. Les fausses alarmes dans les profils GPR sont causées par l’hétérogénéité naturelle du sol ou par la présence d’objets d’origine humaine. Par conséquent, un A-scan GPR est composé de la réflexion d’intérêt (*i.e.*, le signal utile), du clutter et du bruit. En gardant la notation de la section précédente, l’A-scan collecté à la $k^{\text{ème}}$ position peut s’exprimer ainsi :

$$x_k(t) = x_{ku}(t) + \underbrace{x_{ka}(t) + x_{ks}(t) + x_{ko}(t)}_{\text{clutter}} + n(t) \quad (4.6)$$

avec $x_{ku}(t)$ le signal utile, $x_{ka}(t)$ le couplage entre les antennes, $x_{ks}(t)$ la réflexion de la surface du sol, $x_{ko}(t)$ le signal réfléchi par les objets autres que la cible d'intérêt, et $n(t)$ le bruit.

Différentes méthodes pour réduire le clutter peuvent être trouvées dans la littérature [Solimene et al., 2013; van der Merwe and Gupta, 2000]. Une méthode efficace de réduction de clutter est capable de séparer le signal utile des réflexions indésirables. Cependant, étant donné que les différentes méthodes qui existent ont été appliquées à différents ensembles de données acquis dans différents scénarios et avec différents matériels, il n'est donc pas possible de juger *a priori* quelle méthode fournira les performances optimales pour le matériel sélectionné et les conditions environnementales particulières. Ce qui signifie qu'il n'existe pas de technique idéale permettant de réduire le clutter de manière efficace quelle que soit la situation rencontrée.

Dans cette section, nous présentons deux principales méthodes de réduction du clutter : la soustraction de la moyenne/médiane et la décomposition en valeurs singulières. En plus d'être simples à mettre en œuvre, ces méthodes sont efficaces pour un grand nombre de scénarios GPR.

4.3.1 Soustraction de la moyenne/médiane

La technique de la soustraction de la moyenne s'effectue en soustrayant du champ total, le A-scan moyen/médian calculé à partir tous les A-scans du radargramme. En conséquence, chaque A-scan filtré $x'_k(t)$ est exprimé comme suit :

$$x'_k(t) = x_k(t) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t) \quad (4.7)$$

ou bien :

$$x'_k(t) = x_k(t) - \text{médiane} \{ x_i(t) \} \quad \text{avec :} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4.8)$$

Il s'agit d'un moyen simple pour éliminer la réflexion de l'onde directe et celle de l'interface air-sol en tirant parti de la corrélation des différents A-scans le long de la ligne de mesure. Cependant, cette méthode présente deux inconvénients majeurs : d'une part, la soustraction de la moyenne/médiane agit aussi sur le signal utile $x_{ku}(t)$, et d'autre part, elle n'offre aucun degré de liberté sur le niveau de réduction du clutter désiré.

La figure 4.6 présente le B-scan initial (figure 4.2) après soustraction de la valeur moyenne.

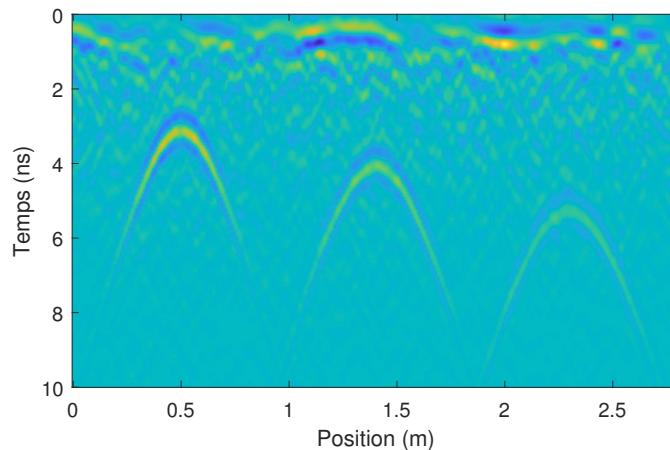


FIGURE 4.6 – B-scan initial après soustraction de la moyenne.

4.3.2 Décomposition en valeurs singulières

La technique de la décomposition en valeurs singulières (ou [Singular Value Decomposition \(SVD\)](#)) fournit un moyen plus précis et systématique pour réduire le niveau du clutter dans des scénarios complexes avec un faible rapport signal/clutter [\[Kim et al., 2007\]](#). Dans l'approche [SVD](#), la matrice X du B-scan de taille $M \times N$ peut être décomposée en matrices orthogonales comme exprimée par l'équation (4.9) :

$$X = UDV^T = \sum_{i=1}^N \lambda_i u_i v_i^T \quad (4.9)$$

avec $U = [u_1, u_2, \dots, u_M]$ et $V = [v_1, v_2, \dots, v_N]$ les matrices orthogonales de X contenant les vecteurs propres (u_i et v_i) des matrices XX^T et $X^T X$, respectivement. D est une matrice diagonale qui contient les valeurs singulières de la matrice X disposées dans un ordre décroissant : $\{\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_r\}$, où r est le rang de la matrice X .

L'idée derrière l'approche [SVD](#) est de reconstruire le B-scan original en utilisant seulement quelques valeurs propres, tandis que le reste est mis à zéro. Les premières valeurs singulières sont associées à des caractéristiques fortement corrélées telles que le couplage direct d'antenne et la réflexion du sol. En revanche, les faibles valeurs singulières correspondent à des caractéristiques faiblement corrélées, à savoir la réponse de la cible et le bruit aléatoire.

Comme le clutter est associé aux p premières valeurs singulières, alors le radargramme peut être reconstruit en projetant la matrice X sur le complémentaire du sous-espace orthogonal des p premières valeurs singulières :

$$X' = \sum_{i=p+1}^N \lambda_i u_i v_i^T \quad (4.10)$$

Cependant, très peu de travaux ont été réalisés sur l'estimation du nombre des valeurs singulières à supprimer (p) [\[Kutz et al., 2016\]](#). Cette estimation est souvent réalisée sur la base d'une inspection visuelle. Dans le travail de cette thèse, après avoir tracé les valeurs singulières de la matrice des données dans un ordre décroissant (figure 4.7), le nouveau radargramme est reconstruit en éliminant les premières valeurs singulières dominantes jusqu'à obtenir une image avec un niveau du clutter suffisamment réduit. La figure 4.8 illustre l'effet de la suppression des trois premières valeurs singulières du radargramme initial (figure 4.2).

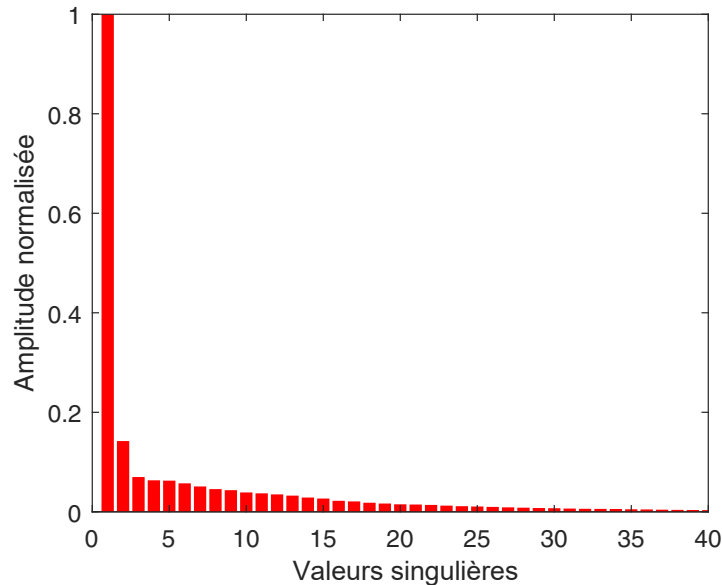
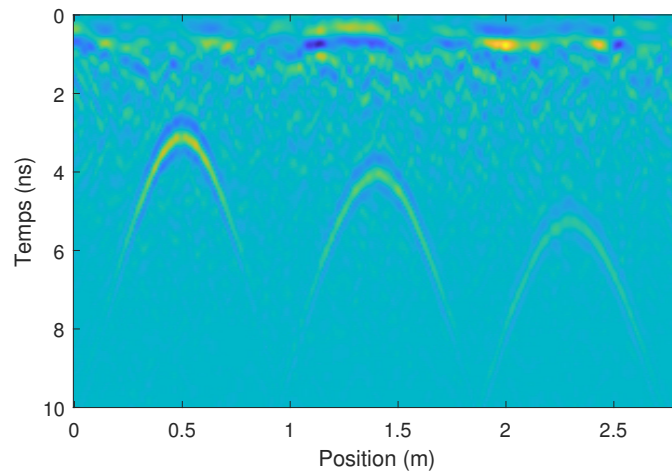
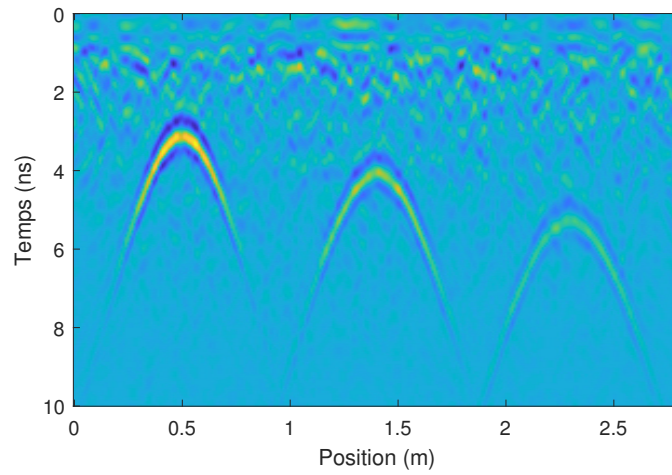


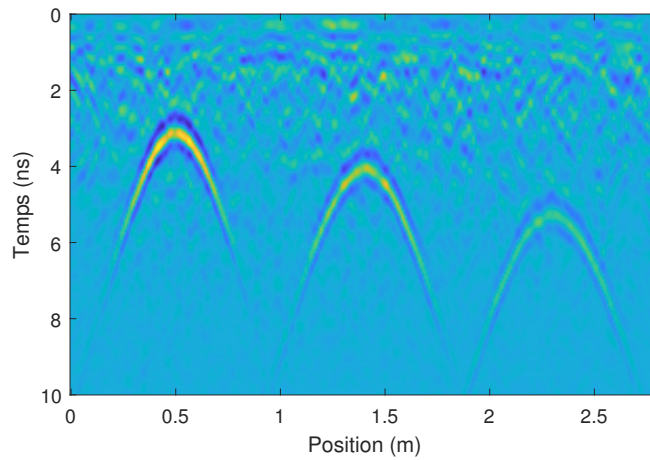
FIGURE 4.7 – Les valeurs singulières correspondantes au B-scan initial.



(a) Résultat après suppression de λ_1 .



(b) Résultat après suppression de λ_1 et λ_2 .



(c) Résultat après suppression de λ_1 , λ_2 et λ_3 .

FIGURE 4.8 – Réduction du clutter par la décomposition en valeurs singulières. Le couplage entre les antennes et la réflexion de la surface du sol sont éliminées avec la première valeur singulière. L'impact de la nature hétérogène du sol est atténué avec les deuxième et troisième valeurs singulières.

Pour mieux visualiser l'apport de la suppression des valeurs singulières dominantes dans la réduction du clutter, nous traçons sur la figure 4.9 le signal du A-scan central (position = 1,4 m) et le résultat de l'élimination de la première, deux premières et trois premières valeurs singulières.

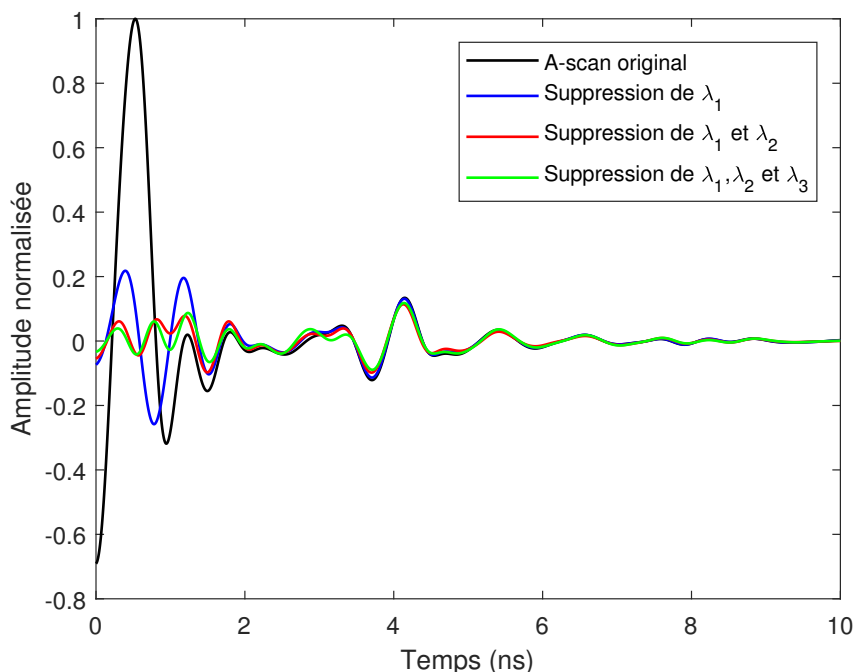


FIGURE 4.9 – Comparaison du A-scan central après application de l'approche SVD.

Dans le cas étudié, le résultat de la suppression des trois premières valeurs singulières est retenu et la compensation du gain est ensuite effectuée. La figure 4.10 présente le radargramme résultant où les hyperboles des trois modèles de racines apparaissent de façon claire. L'effet du clutter est considérablement réduit.

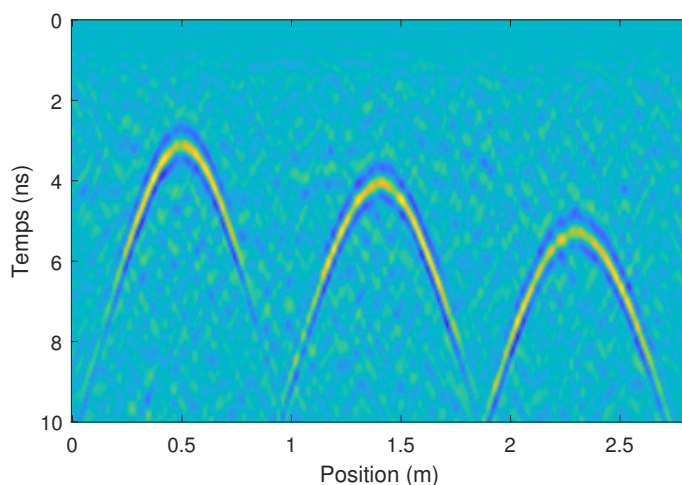


FIGURE 4.10 – B-scan initial après suppression des trois premières valeurs singulières et application du gain temporel.

4.4 Estimation de la permittivité relative du sol

Après avoir effectué le pré-traitement des données et la réduction du clutter, l'étape suivante dans le traitement proposé est la migration. Toutefois, cette technique nécessite la connaissance de la permittivité relative du sol prospecté. Cette information est nécessaire pour convertir l'axe du temps aller-retour (t) à un axe de profondeur (d) selon l'équation (4.11) :

$$d = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{t}{2} \quad (4.11)$$

Parmi les méthodes qui existent pour déterminer la valeur de la permittivité relative du sol on trouve la méthode basée sur la configuration **PMC**. Le scénario de cette configuration a été présenté précédemment dans la figure 1.18b. Une illustration d'un radargramme collecté en utilisant la configuration **PMC** est présentée dans la figure 4.11. Dans un tel profil, nous pouvons distinguer trois types de réflexions :

1. Onde aérienne directe (*direct air wave*) : il s'agit de la première réflexion enregistrée qui s'est propagée directement de l'antenne Tx à l'antenne Rx à travers l'air à la vitesse de la lumière ($0,3 \text{ m/ns}$).
2. Onde directe du sol (*direct ground wave*) : il s'agit de la deuxième réflexion qui arrive. Elle se déplace directement à travers le sol entre les antennes Tx et Rx à la vitesse du sol.
3. Ondes réfléchies : elles proviennent de la réflexion de l'onde **EM** sur les différentes interfaces du sol.

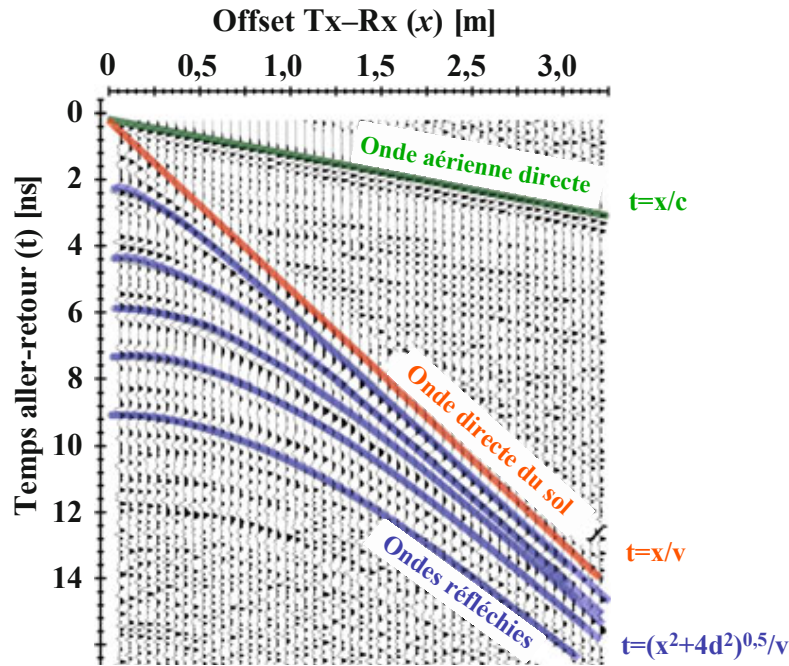


FIGURE 4.11 – Illustration d'un profil GPR collecté par la configuration PMC.

On peut noter que les réflexions directes (aérienne et de sol) se situent sur des lignes droites passant par l'origine. La pente de l'onde directe du sol donne l'information sur la permittivité du sol. Il existe une deuxième méthode pour estimer la permittivité relative du sol à partir du radargramme **PMC** qui se base sur l'étude des ondes réfléchies. Plus de détails sur cette deuxième méthode peuvent être trouvés dans [Yilmaz \[2001\]](#).

Néanmoins, l'estimation de la permittivité du sol à partir d'un radargramme **PMC** est traditionnellement longue à mettre en place sur le terrain puisqu'elle demande d'effectuer une série de mesures pour une seule estimation (déplacement des antennes). Cependant, des récentes adaptations techniques qui permettent une mise en place plus rapide ont été proposées. Par exemple,

Feng et al. [2008] propose d'utiliser un réseau d'antennes réceptrices qui permet de réaliser une acquisition de type source commune (figure 1.18c). Dans ce cas, les antennes sont liées entre-elles de manière fixe et regroupées dans un même boîtier, ce qui facilite l'acquisition, mais nécessite la mise en place d'une architecture électronique plus complexe. Ajoutons à cela que la quasi-totalité des antennes des systèmes GPR existants fonctionne en mode offset Tx-Rx commun. En effet, très souvent, les GPR commerciaux ne donnent pas accès à leur système antennaire, ce qui prive l'utilisateur de réaliser des mesures en configuration PMC, et ainsi déduire la permittivité du sol via cette technique.

Dans cette thèse, la méthode adoptée pour l'estimation de la permittivité du sol repose sur le traitement du radargramme contenant la réflexion de la racine par le biais de la transformée de Hough aléatoire (Randomized Hough Transform (RHT)). Cette dernière se base sur le raccordement d'hyperbole pour déterminer les paramètres du sol (notamment sa permittivité relative) et de la racine (notamment sa profondeur et sa position horizontale). La méthode basée sur la RHT est non seulement rapide et semi-automatique, mais ne nécessite aucune mesure supplémentaire.

L'algorithme de l'approche RHT proposé est implémenté en MATLAB. La première étape de cet algorithme consiste à préparer une image 2-D contenant les réflexions d'intérêt. Cette étape importante peut être réalisée en faisant appel à un algorithme de détection de bords (ou contours). Un bord peut être défini comme un ensemble de pixels connectés se situant sur la ligne frontière entre deux régions différentes [Gao et al., 2010]. De façon générale, la détection des bords est une opération cruciale pour l'analyse des images par ordinateur. Divers algorithmes ont été développés au fil des décennies pour détecter les contours des images :

- *L'opérateur de Roberts*, initialement proposé par Lawrence Roberts en 1963 [Roberts, 1963], est l'un des premiers détecteurs de contours. Cet algorithme effectue une mesure du gradient simple sur l'image, c'est-à-dire qu'il fournit une approximation du gradient d'image par une différenciation discrète qui est réalisée en calculant la somme des carrés des différences entre les pixels diagonalement adjacents. De cette manière, l'opérateur de Roberts met en évidence les régions de hautes fréquences spatiales qui correspondent souvent à des contours. Les principaux avantages de cet opérateur résident dans sa vitesse de calcul et l'absence de paramètres à définir. En revanche, son inconvénient majeur est sa forte sensibilité au bruit.
- *L'opérateur de Sobel* [Sobel and Feldman, 1968] est basé sur la convolution de l'image avec un filtre à valeurs entières dans les directions horizontale et verticale. Il est plus lent à calculer que celui de Roberts, mais a l'avantage de fournir simultanément une différenciation (qui donne la réponse de bord) et un lissage gaussien (qui réduit le bruit), de sorte qu'il est moins sensible au bruit comparé à l'opérateur de Roberts.
- *L'opérateur Laplacien* [Bergholm, 1987] est un peu différent des filtres mentionnés jusqu'à présent et plus rapide en termes de calcul. Ce filtre n'utilise qu'un seul noyau et calcule les dérivées du second ordre en une seule itération. Cependant, il est très sensible au bruit. Souvent, pour corriger ce problème, les images sont lissées par un filtre gaussien avant d'appliquer l'opérateur Laplacien.
- *L'opérateur de Canny* a été proposé par John F. Canny en 1986 [Canny, 1986]. Il s'agit de la méthode de détection des bords la plus couramment utilisée. L'opérateur Canny est plus coûteux en termes de temps de calcul que Roberts, Sobel et Laplacien. Cependant, il fonctionne mieux que tous ces opérateurs dans presque tous les scénarios et il est largement reconnu comme la méthode de détection des contours la plus efficace. Pour ces raisons, et vu l'application réussie de l'opérateur de Canny aux données GPR présentées dans [Mertens et al., 2015] et dans d'autres applications [Ratsakou et al., 2020], cet opérateur a été identifié comme l'algorithme de détection de contours le plus favorable à combiner à la méthode RHT dans ce travail.

4.4.1 Détection des bords par l'opérateur de Canny

Canny a établi trois critères qualitatifs pour le développement du filtre de détection de bord idéal : une détection claire, une localisation précise des pixels de bord, et une réponse de filtre unique. Son objectif était de mettre en place l'algorithme de détection de bord optimal qui réduirait la probabilité de détecter de faux bords et produirait des bords nets dans l'image filtrée. L'algorithme proposé par Canny fonctionne sur des images en niveaux de gris. Par conséquent, la condition préalable est de convertir l'image originale en niveaux de gris avant d'appliquer l'opérateur.

L'algorithme de Canny est un processus qui se déroule en cinq étapes. Dans la première étape, l'image en niveaux de gris est convoluée avec un filtre gaussien de taille $(2k + 1) \times (2k + 1)$ donné par :

$$G(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(i - k - 1)^2 + (j - k - 1)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.12)$$

où $1 \leq i, j \leq 2k + 1$. Cette étape lisse l'image pour réduire les effets du bruit (provoquée par la présence de détails et textures indésirables dans l'image) sur la détection des contours et pour éviter une fausse détection.

La deuxième étape consiste à calculer l'intensité du gradient de l'image gaussienne lissée. Une valeur de la dérivée première dans la direction horizontale (I_x) et verticale (I_y) est ainsi obtenue. L'intensité du gradient est donnée par :

$$I = \sqrt{I_x^2 + I_y^2} \quad (4.13)$$

Un bord dans une image peut pointer dans une variété de directions et l'algorithme de Canny vise à distinguer les bords horizontaux, verticaux et diagonaux de l'image (cette information est utilisée dans l'étape suivante de l'algorithme). Dans ce but, l'angle de gradient est déterminé comme suit :

$$\theta = \arctan\left(\frac{I_y}{I_x}\right) \quad (4.14)$$

et il est arrondi à l'un des quatre angles représentant la verticale, l'horizontale et les deux directions diagonales (0° , 45° , 90° et 135° , respectivement). Par exemple, une direction dans l'intervalle $[0^\circ - 22,5^\circ]$ ou $[157,5^\circ - 180^\circ]$ sera arrondie à 0 .

Dans l'image de l'intensité du gradient obtenue, les contours sont déjà visibles, mais certains d'entre eux sont épais et d'autres fins. La troisième étape de l'algorithme de Canny consiste en l'application d'une procédure de suppression non-maximale qui permet d'atténuer les contours les plus épais. Pour ce faire, l'algorithme vérifie si chaque pixel différent de zéro dans l'image d'intensité du gradient possède une valeur plus élevée que ses deux voisins le long de l'angle du gradient arrondi : si c'est le cas, le pixel est maintenu inchangé, sinon il est mis à 0.

La quatrième étape du processus consiste à appliquer un double seuillage (seuil minimal et maximal). En effet, pour chaque pixel après l'étape de suppression non-maximale, le seuillage décide si le gradient peut correspondre à un point du contour en le comparant aux seuils inférieur et supérieur comme suit :

1. Si l'intensité du gradient est inférieure au seuil minimal fixé, alors le pixel est considéré de gradient faible. Il est donc rejeté (son intensité du gradient est mise à 0).
2. Si l'intensité est supérieure au seuil maximal, le pixel est considéré d'un gradient fort. Il est donc considéré comme un point de contour.
3. Entre les seuils minimal et maximal, le gradient est considéré comme un point de contour uniquement s'il est connecté à un autre point de gradient fort.

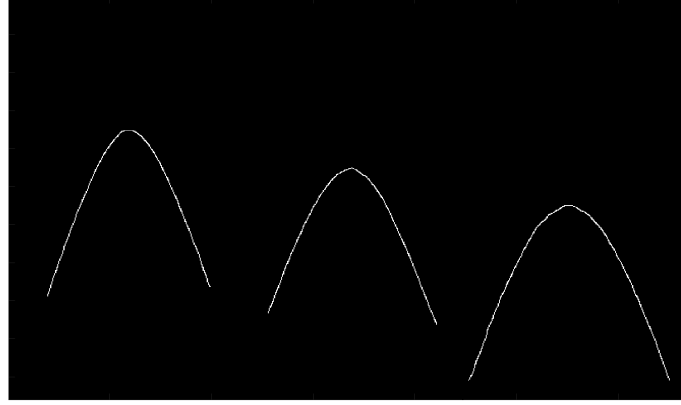


FIGURE 4.12 – Application d'opérateur de Canny pour la détection des contours dans le cas du B-scan initial.

Enfin, la cinquième étape de l'algorithme de Canny est l'alignement des contours par cycle d'hystérésis. L'objectif de cette dernière étape est de supprimer les espaces entre les segments de contour et amener tous les pixels finaux de contour à la même valeur d'intensité.

Concernant l'image du B-scan issu de notre scénario initial, celle-ci a été d'abord convertie en niveaux de gris. Ensuite, un écart-type de 2,5 a été choisi pour le filtre gaussien de l'opérateur de Canny. La taille de ce dernier est automatiquement fixée par MATLAB suite à la définition de l'écart-type. Ensuite, des seuils minimum et maximum de 0,1 et 0,7 étaient adéquats pour faire apparaître les trois hyperboles tout en masquant la contribution du clutter. La figure 4.12 présente l'image binaire issue de l'application de l'algorithme de Canny pour détecter les contours de notre B-scan initial. L'utilisation réussie du détecteur de Canny avec les données de mesures expérimentales sera également présentée dans le chapitre 5.

4.4.2 Approche de la transformée de Hough aléatoire (RHT)

Classiquement, la transformée de Hough est utilisée dans les traitements GPR pour la reconnaissance automatique des hyperboles dans les radargrammes [Li et al., 2016]. L'utilisation de l'approche RHT dans le contexte de notre application vise plutôt à déterminer les paramètres de l'hyperbole associée à la racine. Selon Guo et al. [2013], les coordonnées du sommet de l'hyperbole correspondent à la position exacte de la cible. Ainsi, les paramètres déterminés seront employés pour déduire la position géométrique des racines ainsi que la permittivité relative du sol environnant.

La figure 4.13 décrit le processus de formation d'un B-scan au-dessus d'une racine. Pour toute position d'antenne x le long de la direction de mesure, la distance parcourue par l'onde EM vers l'objet est représentée par la couleur rouge sur la figure 4.13 et calculée selon le théorème de Pythagore comme suit :

$$z^2 = z_0^2 + (x - x_0)^2 \quad (4.15)$$

avec $z = \frac{vt}{2}$ et $z_0 = \frac{vt_0}{2}$ où z_0 est la distance entre la racine et l'antenne lorsque cette dernière est située exactement au-dessus de la racine. Comme illustré dans le schéma de la figure 4.13, le couple (x_0, t_0) correspond aux coordonnées du sommet de l'hyperbole. L'équation (4.15) devient donc :

$$\frac{t^2}{t_0^2} - \frac{(x - x_0)^2}{\left(\frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{t_0}{2}\right)^2} = 1 \quad (4.16)$$

L'équation (4.16) obtenue correspond à une équation d'hyperbole standard :

$$\frac{t^2}{a^2} - \frac{(x - x_0)^2}{b^2} = 1 \quad (4.17)$$

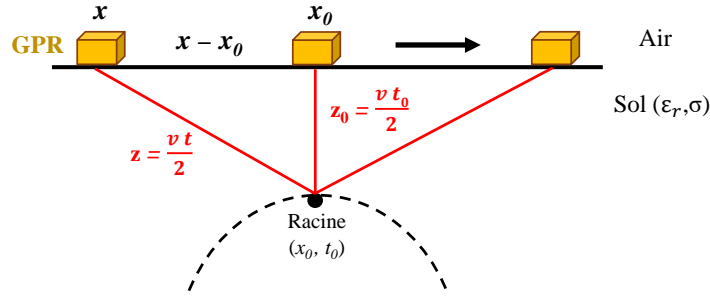


FIGURE 4.13 – Processus de formation de la réflexion hyperbolique d'une racine par GPR.

avec :

$$a = t_0 \quad \text{et} \quad b = \frac{t_0}{2} \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.18)$$

Toutefois, notons que le diamètre de la racine a été négligé lors de notre approche vu la petite taille des racines par rapport à la longueur d'onde (de l'ordre de $\lambda/10$). De plus, dans [Liu et al. \[2019\]](#), et en se basant sur l'équation de l'hyperbole négligeant le diamètre de la cible, l'erreur sur l'estimation de la permittivité relative du sol était de l'ordre de 0,003 (de ϵ_r) pour des sols secs et humides (permittivité relative variant de 3,70 à 13,67).

L'organigramme de la figure 4.14 résume le processus de la méthode [RHT](#) via le détecteur de contours de Canny. La procédure [RHT](#) se base sur l'image binaire des réflexions issues de l'opérateur de Canny. Tout d'abord, comme illustré dans la figure 4.15a, la définition d'une région d'intérêt (ou [Region of Interest \(ROI\)](#)) permet de sélectionner l'hyperbole à traiter et réduit considérablement le temps de calcul. Les points appartenant à l'hyperbole sont obtenus en prenant l'ensemble des pixels non nuls de l'image résultante. Pour résoudre les trois paramètres de l'équation (4.16), à savoir a , b et x_0 , l'algorithme sélectionne de façon aléatoire, les coordonnées de trois points (x_k, t_k) parmi les pixels non nuls récupérés à chaque itération de la boucle [RHT](#) (figure 4.15b). Le triplet de solutions obtenu est ensuite enregistré et le processus avec trois nouveaux couples de coordonnées est répété. Enfin, comme le montre la figure 4.15c, le raccordement de l'hyperbole est réalisé

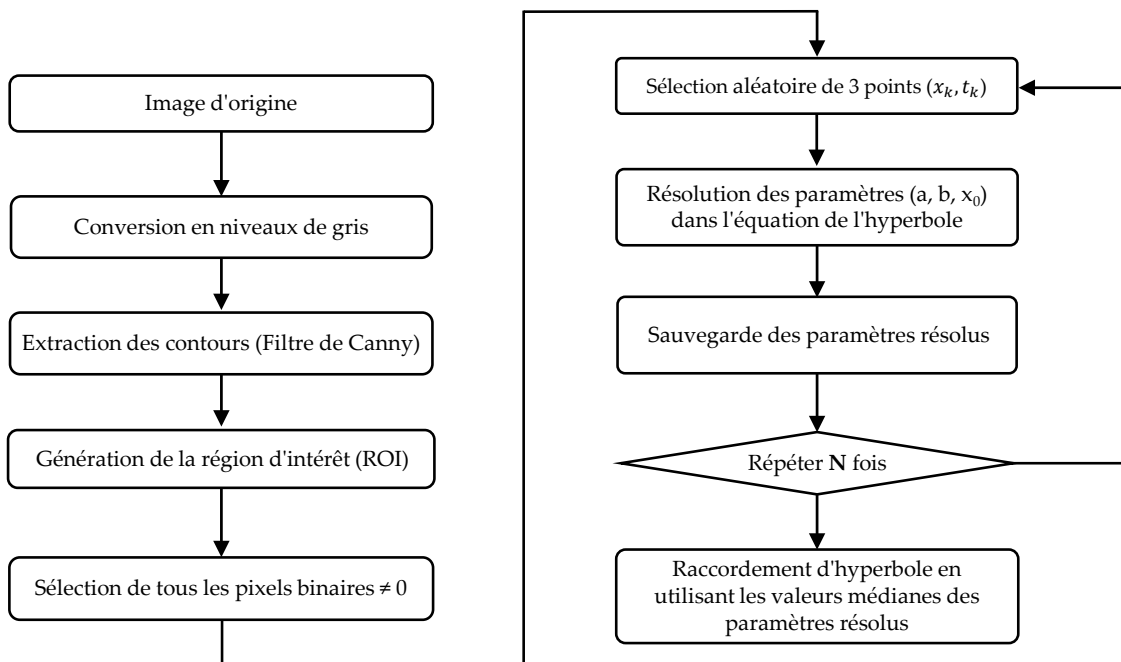


FIGURE 4.14 – Organigramme de l'algorithme RHT pour l'estimation des paramètres de l'hyperbole.

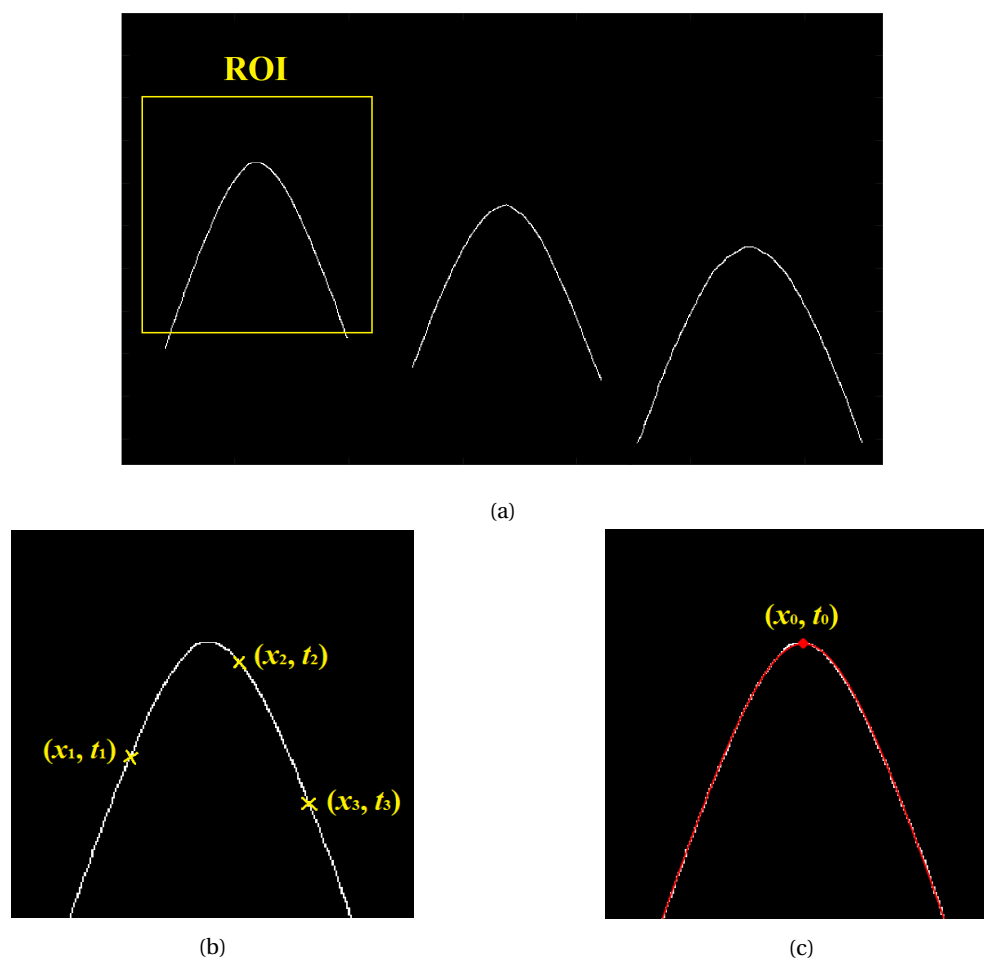


FIGURE 4.15 – (a) Sélection de la région d'intérêt (ROI), (b) sélection de trois points aléatoires appartenant à l'hyperbole de la région d'intérêt, et (c) en ligne rouge le résultat du raccordement de l'hyperbole par la méthode RHT.

en utilisant les valeurs médianes des solutions (a, b, x_0) qui sont obtenues par la transformée de Hough.

La valeur de la permittivité relative du sol hétérogène utilisé dans la simulation et dont les caractéristiques ont été définies dans la section 4.2, est estimée à 4,80. Les coordonnées spatiales des trois racines enfouies dans ce sol ont été également estimées par la méthode RHT et sont résumées dans le tableau 4.1. Les temps de propagation ont été convertis en profondeurs via l'équation (3.16) en utilisant la permittivité relative du sol estimée. L'erreur relative constatée sur la deuxième coordonnée des racines est plus importante que sur la première. Ceci est dû à l'erreur dans l'estimation de la permittivité du sol qui impacte directement celle de la profondeur des racines.

TABEAU 4.1 – Coordonnées spatiales des racines simulées estimées par l'approche RHT.

	Coordonnées exactes $(x_0; y_0)$	Coordonnées estimées $(\hat{x}_0; \hat{y}_0)$	Erreur relative
Racine R1	(0,50 ; 0,15)	(0,505 ; 0,139)	(1% ; 7,33%)
Racine R2	(1,40 ; 0,20)	(1,406 ; 0,212)	(0,42% ; 6%)
Racine R3	(2,30 ; 0,25)	(2,305 ; 0,264)	(0,28% ; 5,6%)

L'efficacité de l'approche RHT a été testée à partir d'un ensemble de simulations impliquant un sol homogène avec différentes valeurs connues de permittivités relatives. Neuf scénarios avec des permittivités relatives allant de 2 (pour les sols secs) à 10 (pour les sols humides) ont été simulés sur gprMax. Les résultats de l'estimation de la permittivité relative du sol sont présentés dans la figure 4.16. La précision de l'estimation est évaluée en calculant l'erreur relative moyenne quadratique (Root Mean Square Relative Error (RMSRE)) définie comme suit :

$$\text{RMSRE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\epsilon_{\text{soil},i}^{\text{act}} - \epsilon_{\text{soil},i}^{\text{est}}}{\epsilon_{\text{soil},i}^{\text{act}}} \right)^2} \quad (4.19)$$

où $\epsilon_{\text{soil},i}^{\text{act}}$ désigne la valeur de la permittivité relative du sol définie dans la simulation i , $\epsilon_{\text{soil},i}^{\text{est}}$ la permittivité relative estimée pour la simulation i , et n le nombre de scénarios simulés. Ici, une valeur de 7,89% de la RMSRE est obtenue.

En plus de l'évaluation de la précision de la méthode proposée, ce test a permis de déterminer le nombre d'itérations nécessaires dans la boucle RHT. Après 100 itérations, il a été observé que la précision n'augmente plus.

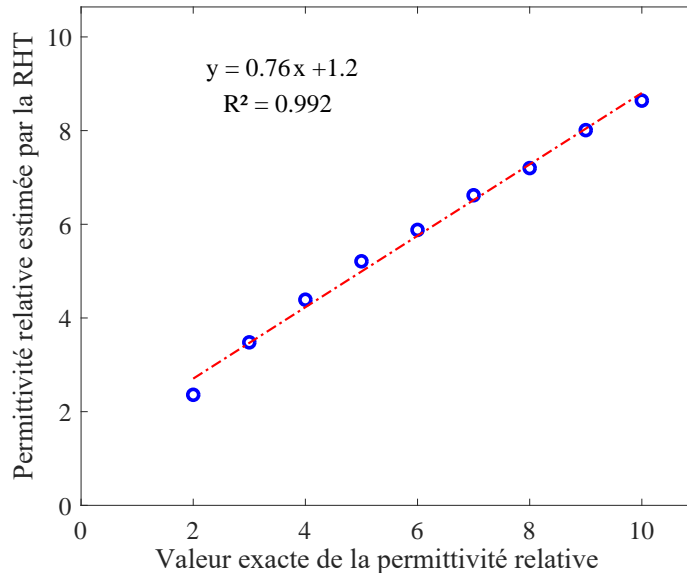


FIGURE 4.16 – Résultats de l'estimation de la permittivité relative du sol par la méthode RHT. Chaque cercle bleu correspond à une simulation réalisée.

4.5 Migration des données

4.5.1 Migration SAR basée sur le filtrage adapté

La technique du filtrage adapté (*Matched Filtering*) est le principe de base de l'imagerie radar à synthèse d'ouverture (SAR) [Chan and Koo, 2008]. Il s'agit d'un filtre dont la réponse impulsionnelle (ou la fonction de transfert) est déterminée par un certain signal qui maximise le SNR pouvant être atteint au niveau du récepteur. De plus, le filtrage adapté se caractérise par la propriété de pouvoir détecter le signal même en présence de bruit [Leuschen and Plumb, 2001]. Il produit un rapport signal de sortie sur puissance de bruit moyen plus élevé pour l'entrée que pour toute autre forme de signal avec le même contenu énergétique.

Afin d'acquérir une compréhension intuitive de la façon dont le filtrage adapté fonctionne, considérons le système simple de la figure 4.17.

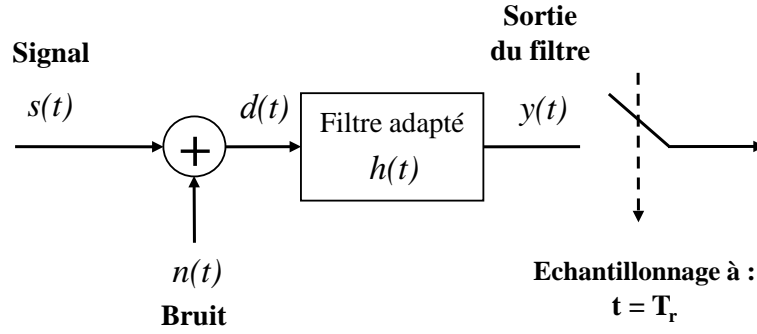


FIGURE 4.17 – Illustration des propriétés du filtrage adapté appliqué au niveau de la chaîne de réception du système GPR.

Soit $s(t)$ un signal d'énergie finie noyé dans un bruit additif stationnaire $n(t)$ de moyenne nulle et de **Densité Spectrale de Puissance (DSP)** notée $s_n(f)$. Le signal somme $d(t)$ s'écrit :

$$d(t) = s(t) + n(t), \quad (4.20)$$

Ensuite, on filtre le signal $d(t)$ par un filtre linéaire (invariant dans le temps) de réponse impulsionnelle $h(t)$ et dont la sortie est notée $y(t)$. Ce signal de sortie contient deux composantes :

$$y(t) = d(t) * h(t) \quad (4.21)$$

$$= y_s(t) + y_n(t) \quad (4.22)$$

$$= s(t) * h(t) + n(t) * h(t) \quad (4.23)$$

Le **SNR** en sortie du filtre à l'instant T_r est défini par :

$$\text{SNR}(T_r) = \frac{y_s^2(t)}{E[y_n^2(t)]} \quad (4.24)$$

Pour déterminer ce rapport, calculons d'abord la composante du numérateur. Pour cela, notons $S(f)$ et $H(f)$ les transformées de Fourier du signal $s(t)$ et de la réponse impulsionnelle du filtre $h(t)$, respectivement. Nous avons ainsi :

$$y_s(t) = \text{TF}^{-1} [S(f) H(f)] = \int_{-\infty}^{+\infty} H(f) S(f) e^{j2\pi f t} df \quad (4.25)$$

où TF^{-1} désigne la **TFL**.

Pour le dénominateur, la **DSP** du bruit à la sortie du filtre s'écrit comme :

$$s_{y_n}(f) = s_n(f) |H(f)|^2 \quad (4.26)$$

ainsi, la puissance moyenne du bruit à la sortie du filtre est donnée par :

$$P_{y_n} = E[y_n^2(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} s_n(f) |H(f)|^2 df \quad (4.27)$$

De (4.25) et (4.27), l'expression du **SNR** à l'instant T_r peut s'écrire comme suit :

$$\text{SNR}(T_r) = \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} a(f) b^*(f) df \right|^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} a(f) a^*(f) df} \quad (4.28)$$

avec :

$$a(f) = \sqrt{s_n(f)} H(f) \quad \text{et} \quad b(f) = \frac{S^*(f)}{\sqrt{s_n(f)}} e^{-j2\pi f T_r} \quad (4.29)$$

Nous pouvons maintenant définir notre exigence de détection du maximum de vraisemblance comme suit : le filtre devrait rendre la puissance de $y_s(t)$ considérablement plus grande (en fait, aussi grande que possible) par rapport à la puissance de $y_n(t)$ à l'instant $t = T_r$. Autrement dit, le filtre doit maximiser le rapport de puissance signal / bruit de sortie SNR (T_r).

A cette fin, l'inégalité de Cauchy-Schwartz sera utilisée pour conclure. En effet, cette inégalité affirme que :

$$\left| \int_{-\infty}^{+\infty} a(f) b^*(f) df \right|^2 \leq \int_{-\infty}^{+\infty} a(f) a^*(f) df \int_{-\infty}^{+\infty} b(f) b^*(f) df \quad (4.30)$$

appliquée au numérateur de (4.28), elle donne :

$$|\text{SNR}(T_r)| \leq \int_{-\infty}^{+\infty} b(f) b^*(f) df \quad (4.31)$$

l'égalité dans (4.30) est obtenue lorsque :

$$a(f) = k b(f) \quad (4.32)$$

ce qui donne en remplaçant les expressions de $a(f)$ et $b(f)$:

$$H(f) = k \frac{S^*(f)}{s_n(f)} e^{-j2\pi f T_r} \quad (4.33)$$

Dans le cas d'un bruit blanc de DSP : $s_n(f) = \frac{N_0}{2}$, nous obtenons :

$$H(f) = K S^*(f) e^{-j2\pi f T_r} \quad (4.34)$$

avec $K = 2k/N_0$. En prenant la TFI de (4.34), nous obtenons l'expression de la réponse impulsionnelle du filtre adapté :

$$h(t) = K s^*(T_r - t) \quad (4.35)$$

En pratique, la constante K est prise égale à l'unité. Ainsi, la réponse impulsionnelle du filtre qui maximise le SNR au niveau du récepteur est une version conjuguée, inversée dans le temps et retardée du signal émis. De plus, le SNR maximal vérifie :

$$\text{SNR}(T_r)^{\max} = \int_{-\infty}^{+\infty} b(f) b^*(f) df \quad (4.36)$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2}{N_0} |S(f)|^2 df \quad (4.37)$$

$$= \frac{2E}{N_0} \quad (4.38)$$

où E est l'énergie du signal $s(t)$.

Il s'agit d'un résultat très puissant car, comme nous pouvons le constater, le SNR maximal ne dépend pas de la forme du signal $s(t)$ mais uniquement de son énergie. Cela signifie une certaine liberté pour le concepteur du système GPR de sélectionner une forme d'impulsion spécifique pour optimiser d'autres exigences de conception (l'exigence la plus courante étant la bande passante) tout en garantissant le même SNR.

En ce qui concerne le signal collecté par l'antenne GPR selon l'approche SAR illustrée dans la figure 4.18, le SNR est maximisé à l'instant T_r correspondant au retard vers la racine. Si l'on note (x_0, y_0) les coordonnées spatiales de la racine, le retard T_r peut s'exprimer via le théorème de Pythagore comme suit :

$$\left(\frac{cT_r}{2\sqrt{\epsilon_r}} \right)^2 = (x - x_0)^2 + y_0^2 \quad (4.39)$$

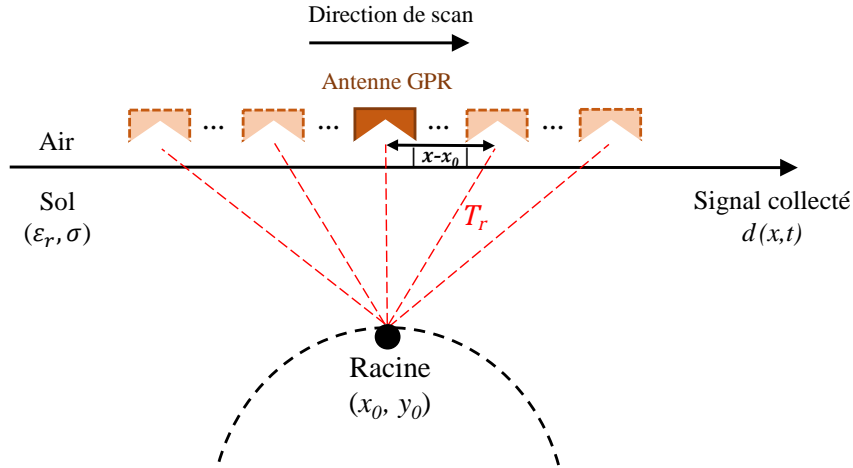


FIGURE 4.18 – Scénario de collection du signal SAR.

qui peut être réécrit comme :

$$T_r = \frac{2\sqrt{\epsilon_r}}{c} \sqrt{(x - x_0)^2 + y_0^2} \quad (4.40)$$

Cette écriture correspond à un système mono-statique. Pour un système bi-statique, il faudra prendre en compte la séparation entre les antennes Tx-Rx. Si l'on note cette séparation SP, l'expression du retard T_r devient :

$$T_r = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{c} \left(\sqrt{(x - x_0)^2 + y_0^2} + \sqrt{(x - x_0 + SP)^2 + y_0^2} \right) \quad (4.41)$$

D'autre part, le signal émis par l'antenne lors de nos simulations [GPR](#) est un monopulse gaussien dont l'expression a été rappelée dans le chapitre 1 (équation (1.44)). Par conséquent, la réponse impulsionnelle du filtre adapté correspondant s'écrit comme :

$$h(t) = s^*(T_r - t) \quad (4.42)$$

$$= 2\sqrt{\frac{e}{2\xi}} \xi(t + \tau - T_r) \exp(-\xi(t + \tau - T_r)^2) \quad (4.43)$$

Enfin, la convolution de la réponse impulsionnelle du filtre adapté $h(t)$ avec le signal reçu $d(t)$ résulte en une image $y(t)$ donnée par :

$$y(t) = d(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} d(\alpha) h(t - \alpha) d\alpha \quad (4.44)$$

L'image ainsi obtenue présente des pixels à la position de la racine avec un [SNR](#) plus important que le reste de l'image. La figure 4.19 présente le processus de rétro-propagation basée sur la technique du filtrage adapté appliquée au cas du scénario de démonstration. Nous pouvons voir à travers le résultat final (figure 4.19d) que la position des trois hyperboles a bien été corrigée. Toutefois, l'application du filtrage adapté résulte en deux signatures d'amplitudes opposées à cause des réflexions multiples. L'étape suivante dans la chaîne de traitement proposée conduira à une correction de ce phénomène.

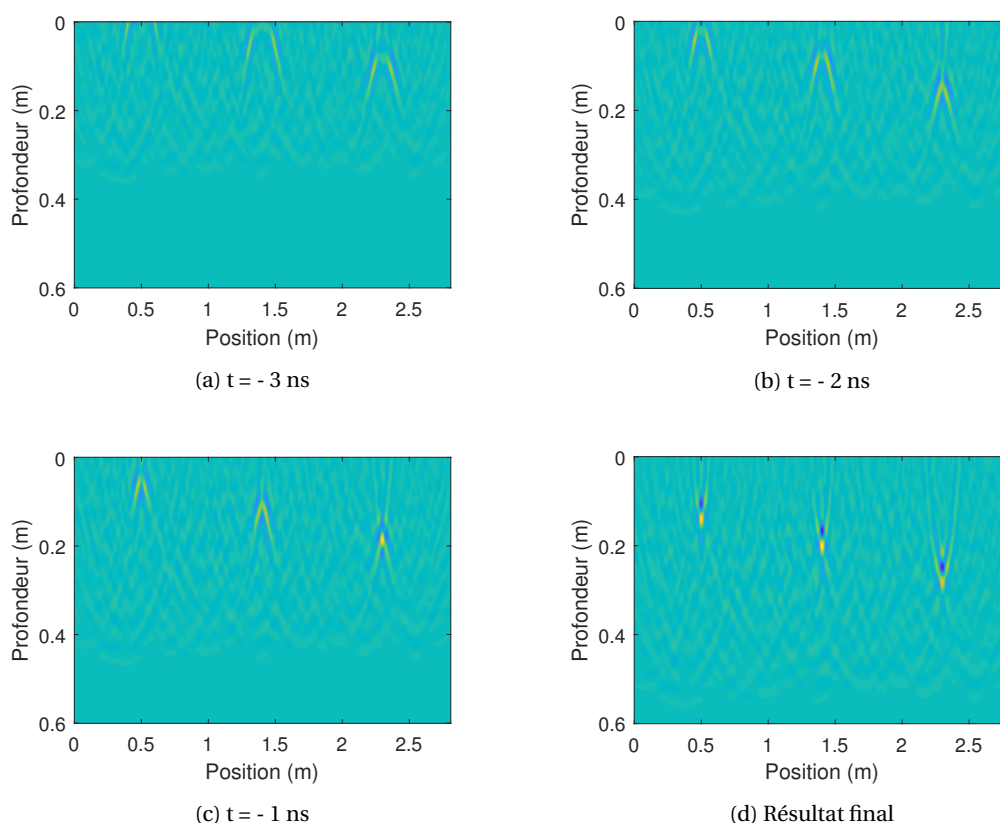


FIGURE 4.19 – Snapshots montrant le processus de correction des positions des hyperboles par rétro-propagation du filtrage adapté.

4.5.2 Transformée d'Hilbert

Comme nous l'avons vu précédemment (section 4.2.2), la transformée d'Hilbert permet d'obtenir l'enveloppe du signal et fournit plutôt l'information sur le module au lieu de l'amplitude. Dans le traitement que nous proposons, l'application de cette technique en aval du filtrage adapté permet d'aboutir à une signature unique de la racine. La figure 4.20 présente le B-scan initial après application de la transformée d'Hilbert.

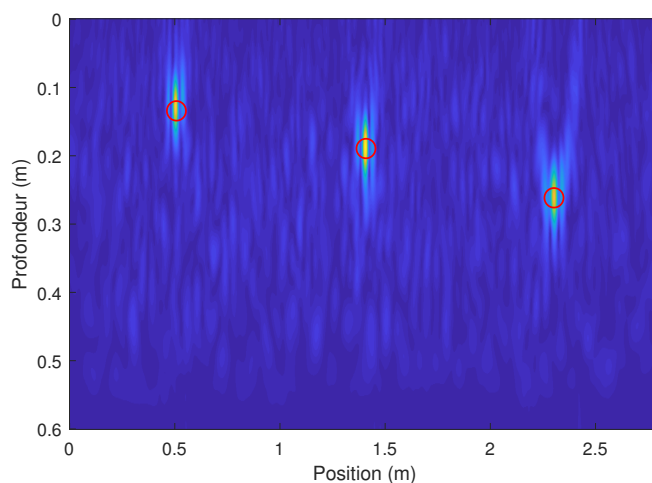


FIGURE 4.20 – Application de la transformée d'Hilbert au résultat du filtrage adapté. Les cercles en rouge représentent les positions exactes des trois racines.

4.6 Validation de la chaîne de post-traitement sur des données synthétiques

La chaîne de post-traitement proposée a pour objectif de reconstruire l'architecture racinaire dans ses trois dimensions à partir des données GPR collectées dans un milieu hétérogène. Dans le but de valider l'intégralité du processus et tester la performance des techniques de traitement proposées, nous avons simulé la présence de différents modèles de racines dans des environnements réalistes (sol hétérogènes en 3-D).

4.6.1 Modèles racinaires considérés

1^{er} scénario 3-D

Dans un premier temps, nous avons considéré deux modèles racinaires ayant les structures de base pour modéliser toute autre architecture racinaire. Il s'agit d'une ramification élémentaire de forme Y (figure 4.21a) et d'une structure sinueuse de forme Z (figure 4.21b). Les deux modèles sont constitués de trois morceaux cylindriques de même diamètre et teneur en eau ($d = 3$ cm, $\theta_g = 50\%$). Ils sont enfouis à une profondeur de 15 cm et parallèles à l'axe z. Le sol de la simulation considérée est présenté dans la figure 4.22. Il s'agit d'un sol sableux hétérogène modélisé par les fractales avec les paramètres suivants : $N = 100$ matériaux, $D = 1,5$; $S = 0,7$; $C = 0,3$; $\theta_v = [0-10\%]$; $\rho_a = 2$ g/cm³; $\rho_s = 2,66$ g/cm³.

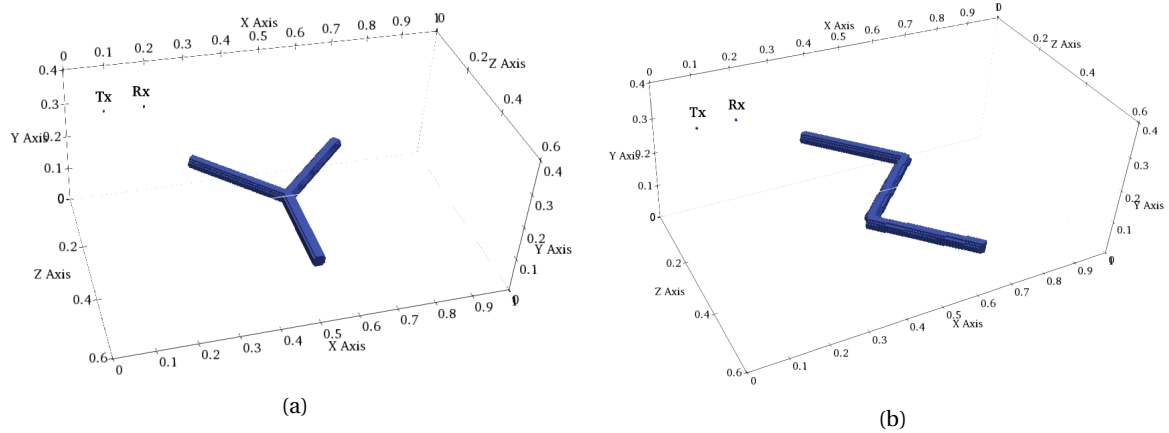


FIGURE 4.21 – Modèles de racines : (a) modèle de forme Y, et (b) modèle de forme Z.

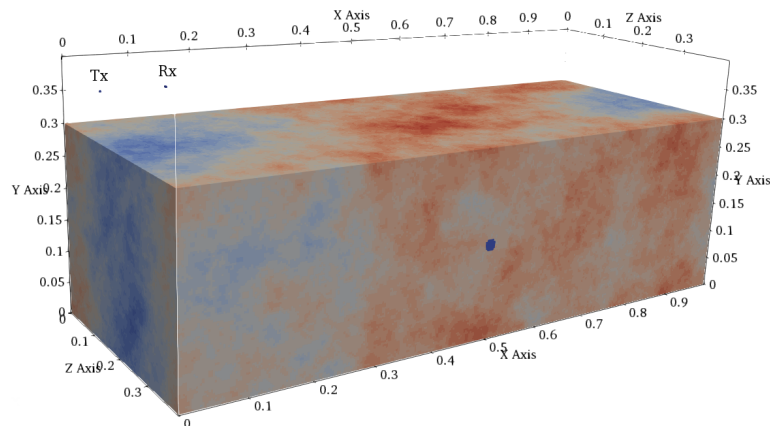


FIGURE 4.22 – Modèle de sol hétérogène utilisé dans la simulation 3-D.

2^{ème} scénario 3-D

Par la suite, une autre structure racinaire plus complexe a été considérée pour tester notre chaîne de post-traitement GPR (figure 4.23). Plusieurs paramètres ont été pris en compte dans la modélisation de cette structure. D'abord, nous avons considéré un schéma de ramification dichotomique, comme l'un des types de ramification les plus courants dans les racines des arbres. Pour simplification, nous avons considéré uniquement les deux premiers ordres de ramification. En ce qui concerne les diamètres des segments, ils suivent le modèle de Da Vinci (introduit dans la section 3.3.1) qui décrit la relation entre les diamètres des branches parents et filles. Les diamètres ainsi définis sont résumés dans le tableau 4.2.

Un autre facteur important pris en compte dans la modélisation de la racine est l'angle relatif entre les segments racinaires et la ligne de scan GPR. Comme nous l'avons vu précédemment, l'orientation de la racine est un facteur crucial qui impacte la précision de la détection, en particulier dans la reconstruction tridimensionnelle de l'architecture racinaire. À la lumière de ce que nous avons vu dans la section 3.3.2, et compte tenu de la configuration utilisée dans la simulation, l'angle de croisement maximal a été fixé à 60° (90° - 30°).

Enfin, un sol hétérogène possédant les mêmes caractéristiques décrites pour le sol des deux modèles précédents a été utilisé avec ce modèle dichotomique (voir figure 4.24).

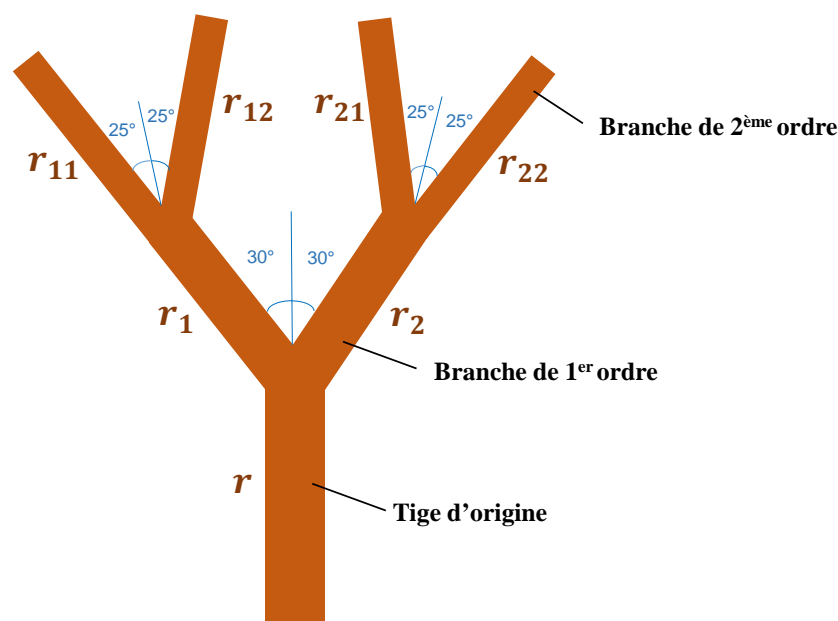


FIGURE 4.23 – Le modèle racinaire dichotomique proposé.

TABLEAU 4.2 – Diamètres et longueurs des segments du modèle racinaire dichotomique.

Segment racinaire	Diamètre (cm)	Longueur (cm)
r	4	40
r1	3,0	35
r2	2,6	35
r11	2,0	30
r12	2,3	30
r21	1,9	30
r22	1,6	30

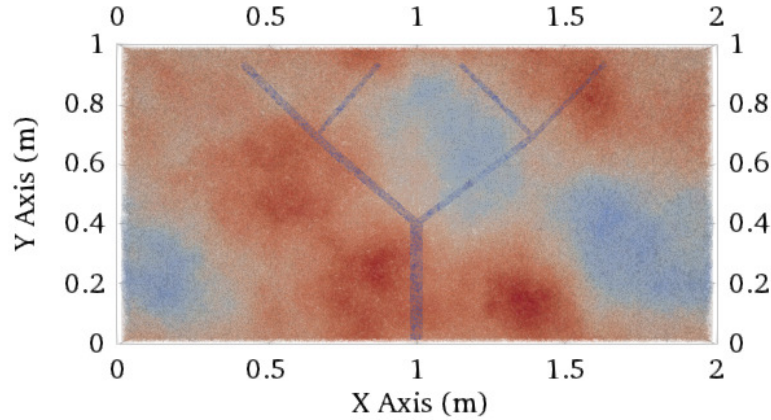


FIGURE 4.24 – Vue de dessus du scénario de simulation 3-D. Le modèle racinaire est enfoui à 15 cm de profondeur dans le sol hétérogène.

4.6.2 Résultats du traitement

Concernant le premier scénario 3-D, 41 B-scans ont été effectués dans la direction de l'axe x pour les deux modèles racinaires. L'application de la chaîne de post-traitement proposée résulte en des signatures claires dans les B-scans. Un exemple de traitement des radargrammes issus des deux parties supérieure et inférieure de la racine de forme Y est présenté dans la figure 4.25. La différence entre les signatures finales des deux radargrammes peut être expliquée par la différence de polarisation. En effet, la partie inférieure de la racine de forme Y est perpendiculaire à la direction de mesures des antennes (axe x), ce qui produit une réponse hyperbolique symétrique et complète, et, par conséquent, une signature bien focalisée après les étapes du filtrage adapté et la transformée d'Hilbert.

Finalement, une interpolation de type spline cubique dans la direction perpendiculaire à celle des B-scans (selon l'axe z) est effectuée afin de lisser les images. Cette étape est essentielle pour rendre l'intégralité de la structure racinaire lisse et continue en chaque point, et ainsi produire une meilleure visualisation 3-D. Les figures 4.26 et 4.27 présentent les résultats finaux de la reconstruction tridimensionnelle de l'architecture des deux modèles racinaires simulés.

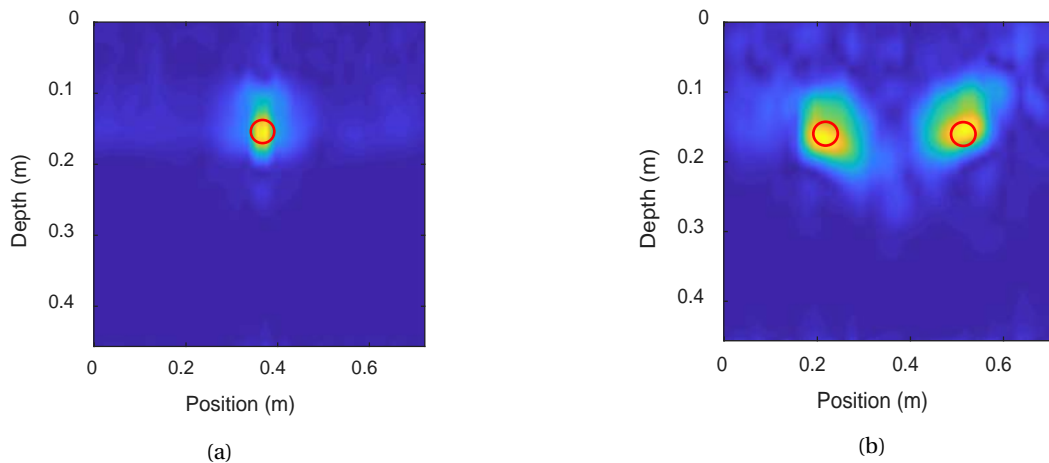


FIGURE 4.25 – Résultat du post-traitement du B-scan provenant de (a) la partie inférieure ($y = 0,5m$), et (b) la partie supérieure ($y = 0,1m$) de la racine de forme Y. Les cercles en rouge représentent les positions exactes des racines.

La présence de quelques inclusions parasites dues à l'hétérogénéité du sol de simulation peut être notée dans les résultats de la reconstruction. En définissant un seuil d'intensité des pixels, nous pouvons ajuster le niveau d'hétérogénéités à conserver dans la représentation 3-D finale. Il faut donc trouver un compromis entre le niveau d'intensité des pixels de la racine et celui des hétérogénéités. Dans notre processus, nous avons choisi de ne conserver que les pixels avec une intensité normalisée supérieure à 0,7.

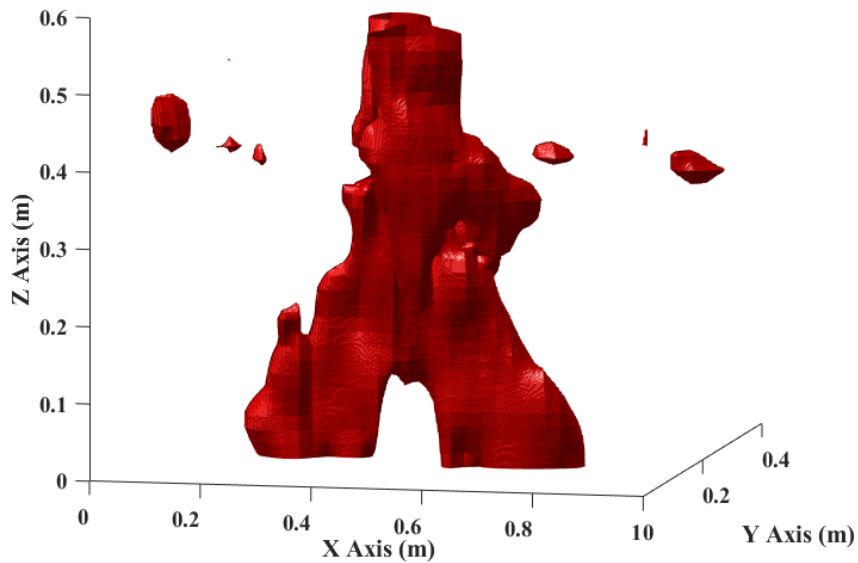


FIGURE 4.26 – La reconstruction tridimensionnelle de l'architecture du modèle racinaire de forme Y.

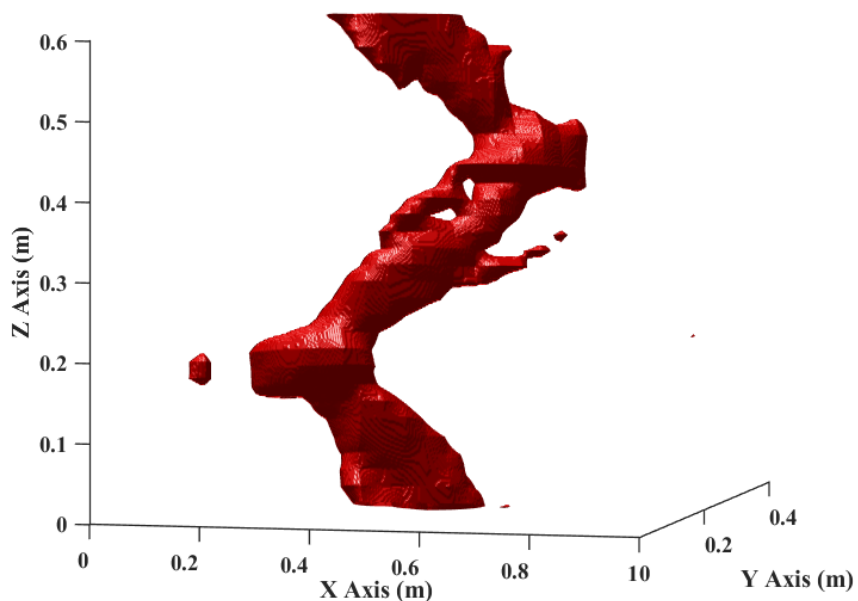


FIGURE 4.27 – La reconstruction tridimensionnelle de l'architecture du modèle racinaire de forme Z.

La figure 4.28 présente le résultat de la reconstruction tridimensionnelle de l'architecture du modèle dichotomique. Comme nous pouvons le noter sur cette figure, l'architecture racinaire reconstruite n'est que légèrement impactée par le clutter puisque celui-ci a été considérablement réduit avant l'étape de migration par le filtrage adapté. Par conséquent, la forme du modèle racinaire simulé peut être facilement reconnue avec une précision satisfaisante. Cependant, le résultat de la reconstruction présente une forte réflexion entre chacun des deux segments adjacents de la ramification du second ordre lorsque cette distance est inférieure à 11,7 cm (qui correspond à la résolution horizontale du GPR). En effet, en dessous de cette valeur, les deux segments racinaires ne sont pas suffisamment espacés pour le système GPR, ce qui conduit à un chevauchement des hyperboles qui résulte en une forte réflexion après application du processus du filtrage adapté.

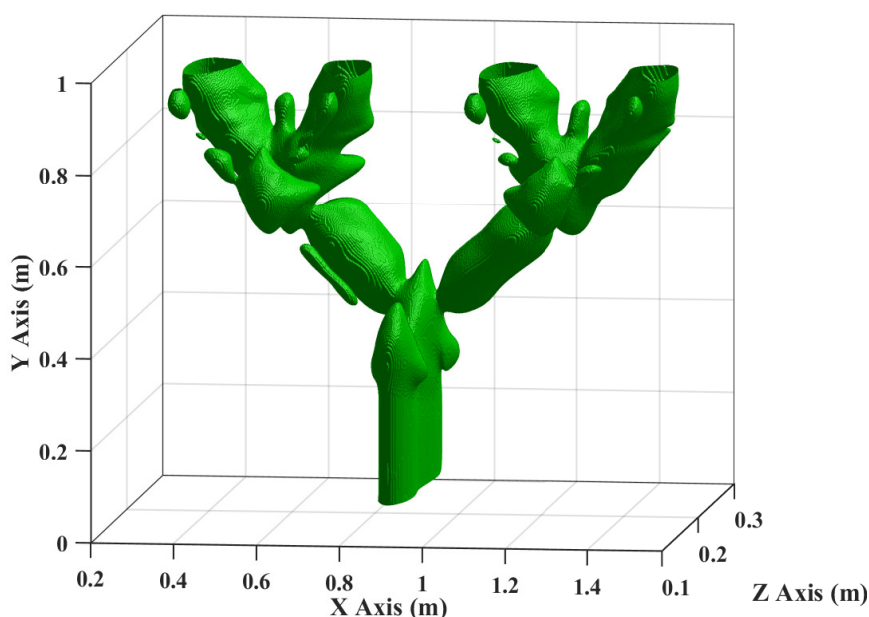


FIGURE 4.28 – La reconstruction tridimensionnelle de l'architecture du modèle racinaire dichotomique par la chaîne de post-traitement proposée.

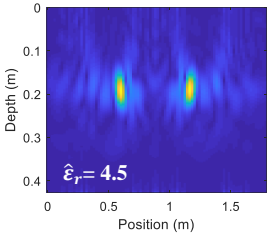
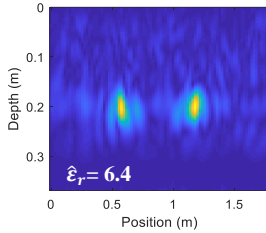
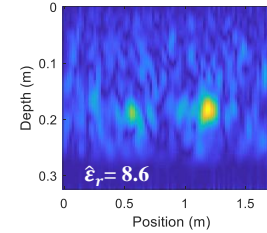
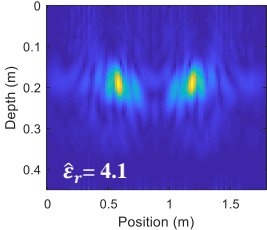
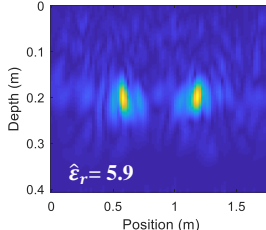
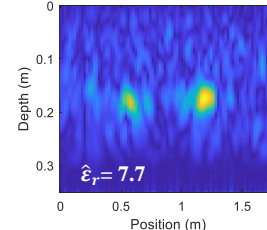
4.6.3 Effet de l'hétérogénéité du sol

Afin d'étudier plus en détail l'effet de l'hétérogénéité du sol sur le post-traitement proposé, nous avons effectué plusieurs simulations numériques (avec le modèle dichotomique) impliquant six types de sols différents (avec différentes compositions et taux d'humidité). Rappelons que la définition des propriétés diélectriques du sol de simulation se fait sur la base du modèle semi-empirique de Peplinski décrit dans le chapitre 3. Dans le tableau 4.3, les résultats ont été présentés sur la même section ($y = 0,60$ m) du modèle dichotomique afin d'observer l'impact des différents sols.

Après avoir effectué les opérations de pré-traitement et de réduction du clutter, la permittivité relative du sol a été estimée pour chaque scénario à l'aide de la méthode RHT. Comme prévu, la permittivité relative des sols argileux est souvent plus petite que celle des sols sableux. En fait, en raison de leur porosité élevée, les sols argileux pourraient avoir une grande fraction d'air qui s'ajoute à l'augmentation globale de leur vitesse [Daniels, 2005].

Ensuite, les techniques de filtrage adapté et la transformée d'Hilbert ont été appliquées. Comme le montre le tableau 4.3, le SNR diminue avec l'augmentation de l'humidité du sol. En fait, les signatures des deux parties symétriques du modèle racinaire ne sont pas parfaitement similaires en raison de la variation spatiale de l'humidité du sol dans un environnement hétérogène. Dans un sol sableux très humide (troisième colonne du tableau 4.3), ce phénomène a été exacerbé par la valeur élevée d'humidité du sol, ce qui rend l'une des signatures de la racine très atténuée.

TABLEAU 4.3 – Résultats de la simulation numérique sur la section transversale du modèle racinaire à $y = 0,60$ m impliquant six types de sol différents. $\hat{\epsilon}_r$ représente la permittivité diélectrique du sol estimée à l'aide de l'approche RHT.

Humidité du sol Composition du sol	Modérément humide $f_u = [0 - 10\%]$	Humide $f_u = [0 - 20\%]$	Très humide $f_u = [0 - 35\%]$
Sol sableux ($S = 0,7$; $C = 0,3$)			
Soil argileux ($S = 0,3$; $C = 0,7$)			

Dans le cadre des mesures *in situ*, les résultats de ce tableau peuvent être interprétés comme suit : lorsque le sol est très hétérogène et que l'humidité du sol présente une variation spatiale considérable, verticalement et/ou horizontalement (troisième colonne du tableau 4.3 par exemple), les hyperboles des racines s'accompagnent d'un faible SNR et l'estimation de la permittivité diélectrique du sol souffre d'une erreur significative. Cela a un impact considérable sur les résultats de la chaîne de post-traitement proposée et nécessite l'exploration de méthodes alternatives afin de mieux estimer la permittivité du sol dans ces cas.

D'autre part, lorsque le contraste sol-racines n'est pas assez important (ex. racine morte), les réflexions dues aux racines ne sont pas visibles et donc le post-traitement devient difficile. Comme nous l'avons montré dans le chapitre 3 à travers des simulations numériques validées par les expériences au laboratoire, la détection des racines par GPR semble impossible lorsque le contraste entre les racines et le sol environnant est faible, même avec des racines à diamètre important. Ce qui limite également l'utilisation du post-traitement proposé.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les détails des techniques de traitement des données GPR développées au cours de cette thèse. La chaîne de post-traitement que nous proposons permet de reconstruire l'architecture tridimensionnelle des racines dans un sol hétérogène sans aucune information *a priori* sur ce milieu.

D'abord, l'approche SVD rend la réflexion de la racine plus claire et dominante. Elle permet également une flexibilité dans la réduction du clutter au niveau souhaité en sélectionnant le nombre des valeurs singulières à éliminer. Ce dernier dépend de la profondeur des objets et de la quantité du clutter présent dans le sol. Ensuite, dans le processus d'estimation de la permittivité relative du sol par la méthode RHT, l'opérateur de Canny employé utilise un filtre qui réduit le bruit autour de la réflexion d'intérêt. La possibilité d'ajuster les seuils de ce filtre offre une flexibilité supplémentaire à la chaîne de traitement, ce qui facilite son adaptation aux différents scénarios rencontrés. Enfin, le filtrage adapté est proposé comme une technique de migration résistante au bruit. La combinaison de cet outil avec la transformée d'Hilbert permet de mieux focaliser la signature de la racine et corrige l'effet des réflexions multiples.

Néanmoins, les processus de la chaîne proposée restent sensibles aux contraintes du terrain (contraste sol-racines insuffisant, orientation de la racine en dehors de la plage de détection, etc.). De plus, une limitation liée à la chaîne de post-traitement elle-même est qu'elle nécessite une intervention humaine pour identifier la région d'intérêt dans le processus d'estimation de la permittivité du sol, ce qui prend du temps. Une attention future devrait être accordée à l'amélioration d'un algorithme de détection automatique de la région d'intérêt pour rendre le processus totalement automatique (comme celui proposé dans [Mertens et al. \[2015\]](#) ou dans [Pasolli et al. \[2009\]](#)).

Finalement, l'intégralité de la chaîne proposée a montré son efficacité dans la reconstruction des architectures racinaires modélisées sur gprMax via les modèles diélectriques et topologiques réalistes présentés dans le chapitre 3. Différents scénarios ont été essayés et un degré acceptable de résolution a été atteint. Dans le chapitre suivant, nous verrons le potentiel de la chaîne proposée dans la reconstruction 3-D des prototypes racinaires au laboratoire et des racines des arbres réels sur le terrain.

Bibliographie

- Benedetto, A., Tosti, F., Ciampoli, L. B. and D'Amico, F. [2017]. An overview of ground-penetrating radar signal processing techniques for road inspections, *Signal Processing* **132** : 201–209. [97](#)
- Bergholm, F. [1987]. Edge focusing, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **5**(6) : 726–741. [105](#)
- Canny, J. [1986]. A computational approach to edge detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **PAMI-8**(6) : 679–698. [105](#)
- Chan, Y. K. and Koo, V. C. [2008]. An introduction to synthetic aperture radar (SAR), *Progress In Electromagnetics Research* **2** : 27–60. [110](#)
- Daniels, D. J. [2005]. Ground Penetrating Radar, in K. Chang (ed.), *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*, Wiley Online Library. [119](#)
- Feng, X., Sato, M., Zhang, Y., Liu, C., Shi, F. and Zhao, Y. [2008]. CMP antenna array GPR and signal-to-clutter ratio improvement, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **6**(1) : 23–27. [105](#)
- Gao, W., Zhang, X., Yang, L. and Liu, H. [2010]. An improved Sobel edge detection, *2010 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, Chengdu*, Vol. 5, IEEE, pp. 67–71. [105](#)
- Guo, L., Chen, J., Cui, X., Fan, B. and Lin, H. [2013]. Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification : a review, *Plant and Soil* **362**(1-2) : 1–23. [107](#)
- Kim, J.-H., Cho, S.-J. and Yi, M.-J. [2007]. Removal of ringing noise in GPR data by signal processing, *Geosciences Journal* **11**(1) : 75–81. [101](#)
- Kutz, J. N., Brunton, S. L., Brunton, B. W. and Proctor, J. L. [2016]. *Dynamic Mode Decomposition : Data-Driven Modeling of Complex Systems*, SIAM. [101](#)
- Leuschen, C. J. and Plumb, R. G. [2001]. A matched-filter-based reverse-time migration algorithm for ground-penetrating radar data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **39**(5) : 929–936. [110](#)
- Li, W., Cui, X., Guo, L., Chen, J., Chen, X. and Cao, X. [2016]. Tree root automatic recognition in ground penetrating radar profiles based on randomized Hough transform, *Remote Sensing* **8**(5) : 430. [107](#)
- Liu, X., Cui, X., Guo, L., Chen, J., Li, W., Yang, D., Cao, X., Chen, X., Liu, Q. and Lin, H. [2019]. Non-invasive estimation of root zone soil moisture from coarse root reflections in ground-penetrating radar images, *Plant and Soil* **436**(1-2) : 623–639. [108](#)
- Mertens, L., Persico, R., Matera, L. and Lambot, S. [2015]. Automated detection of reflection hyperbolas in complex GPR images with no a priori knowledge on the medium, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **54**(1) : 580–596. [105](#), [121](#)
- Pasolli, E., Melgani, F. and Donelli, M. [2009]. Automatic analysis of GPR Images : A Pattern-Recognition Approach, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **47**(7) : 2206–2217. [121](#)
- Ratsakou, A., Skarlatos, A., Reboud, C. and Lesselier, D. [2020]. Shape reconstruction of delamination defects using thermographic infrared signals based on an enhanced Canny approach, *Infrared Physics and Technology*. [105](#)
- Roberts, L. G. [1963]. *Machine Perception of Three-Dimensional Solids*, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology. [105](#)

- Sobel, I. and Feldman, G. [1968]. A 3x3 isotropic gradient operator for image processing, *a talk at the Stanford Artificial Project* in pp. 271–272. [105](#)
- Solimene, R., Cuccaro, A., Dell'Aversano, A., Catapano, I. and Soldovieri, F. [2013]. Ground clutter removal in GPR surveys, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **7**(3) : 792–798. [100](#)
- van der Merwe, A. and Gupta, I. J. [2000]. A novel signal processing technique for clutter reduction in GPR measurements of small, shallow land mines, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **38**(6) : 2627–2637. [100](#)
- Yelf, R. [2004]. Where is true time zero?, *Proceedings of the Tenth International Conference on Grounds Penetrating Radar GPR 2004, Delft*, Vol. 1, pp. 279–282. [97](#)
- Yilmaz, Ö. [2001]. *Seismic Data Analysis : Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*, Society of Exploration Geophysicists. [104](#)

Chapitre 5

Expérimentations GPR en laboratoire et sur le terrain

*« One accurate measurement
is worth a thousand expert
opinions. »*

Grace Hopper

Sommaire

5.1 Introduction	126
5.2 Expérimentations en laboratoire	126
5.2.1 Système GPR du laboratoire	126
5.2.2 Antennes de mesures	128
5.2.3 Prototypes de racines	129
5.2.4 Résultats du post-traitement	130
5.3 Mesures sur le terrain	133
5.3.1 Équipement de mesure	133
5.3.2 Principe et apport de la technologie HDR	134
5.3.3 Directives sur la collecte de données GPR autour d'arbres réels	137
5.3.4 Site de mesures	138
5.3.5 Résultats du post-traitement	140
5.4 Conclusion	143

5.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'ensemble des expérimentations qui ont été conduites au cours de cette thèse. Il est divisé en deux grandes parties : mesures expérimentales dans un environnement contrôlé au laboratoire et mesures réelles autour d'un arbre sur le terrain. Dans la première partie du chapitre, le système du laboratoire permettant de réaliser des mesures dans le domaine fréquentiel est présenté. Ce système fait appel à deux antennes de type papillon complémentaires fractales qui ont été conçues et fabriquées au laboratoire et dont les caractéristiques et les performances seront décrites. Ensuite, des prototypes racinaires en bois sont utilisés pour démontrer la faisabilité du processus de reconstruction tridimensionnelle (présenté dans le chapitre 4) avec des données expérimentales.

Dans la deuxième partie du chapitre, les équipements du système radar MALÅ utilisé pour conduire les mesures GPR sur le terrain sont présentés. En comparaison avec les systèmes GPR traditionnels, le système employé ici est équipé de la technologie HDR dont le principe sera expliqué. Parmi les principaux avantages qu'apporte cette technologie : une meilleure résolution, une vitesse d'acquisition plus importante, et un meilleur rapport signal à bruit. Les mesures qui sont présentées dans ce travail ont été effectuées sur un site à proximité de CentraleSupélec. Des directives pratiques concernant la conduite des mesures GPR sur les racines d'arbres réels selon notre expérience sont listées. Finalement, les résultats des mesures et du post-traitement appliqué pour la reconstruction de l'architecture racinaire de l'arbre étudié sont présentés et analysés.

5.2 Expérimentations en laboratoire

5.2.1 Système GPR du laboratoire

Le système GPR bi-statique utilisé est composé d'un système de positionnement d'antennes (ou *Antenna Positioning System (APS)*), un analyseur de réseau vectoriel (ou *Vector Network Analyzer (VNA)*) de type Keysight N9913A, un bac à sable, et enfin deux antennes de type papillon complémentaires fractales. Comme le montre la figure 5.1, les antennes sont placées à une distance de 5 cm de la surface du sol dans une orientation *broadside*. Le système APS permet leurs déplacements dans les deux directions x et y afin d'effectuer des C-scans. Des absorbants sont placés autour du bac à sable pour jouer le rôle des PML. Pour collecter les signaux GPR, les antennes sont connectées au VNA après calibration et les mesures sont effectuées dans la bande de fréquence de [300 MHz – 3,3 GHz] en utilisant une stratégie SFCW dont le principe a été expliqué dans la section 1.4.5 du chapitre 1.

Parmi les avantages de réaliser des mesures SFCW est qu'elle permet de profiter d'une "vraie" large bande passante. Pour comprendre cela, la figure 5.2 compare le spectre typique issu d'un radar impulsionnel avec celui issu d'un radar fréquentiel de type SFCW. Supposons que l'antenne est suffisamment large bande et transmet de manière idéale toute l'énergie de son spectre au sol. Si l'on regarde le spectre correspondant au radar impulsionnel, on constate que lorsqu'on émet une impulsion EM dans le sol, on illuminera ce dernier à la fréquence centrale (principale) de l'impulsion (f_c), puisque par définition cette fréquence correspond au maximum d'énergie rayonnée. On excitera également le sol aux autres fréquences, mais avec moins d'énergie. En revanche, avec un radar SFCW, toutes les fréquences exciteront le sol avec le même niveau d'énergie (toujours dans l'hypothèse d'une antenne suffisamment large bande pour transmettre de manière idéale toute l'énergie qui lui est fournie par la source).

D'un autre côté, le système SFCW permet une plage dynamique de mesure plus importante. Rajoutons à cela qu'un niveau de bruit beaucoup plus faible est atteignable via un simple ajustement de la largeur de bande de fréquence intermédiaire (F.I.) [Yarovoy et al., 2007].

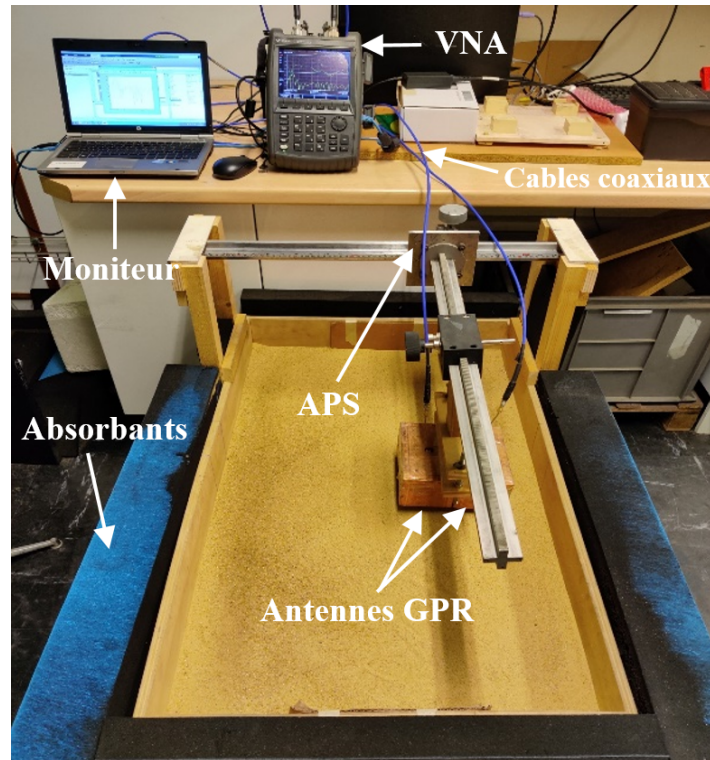


FIGURE 5.1 – Système de mesures GPR au laboratoire. Dimensions du bac : longueur = 100 cm, largeur = 60 cm, hauteur = 40 cm.

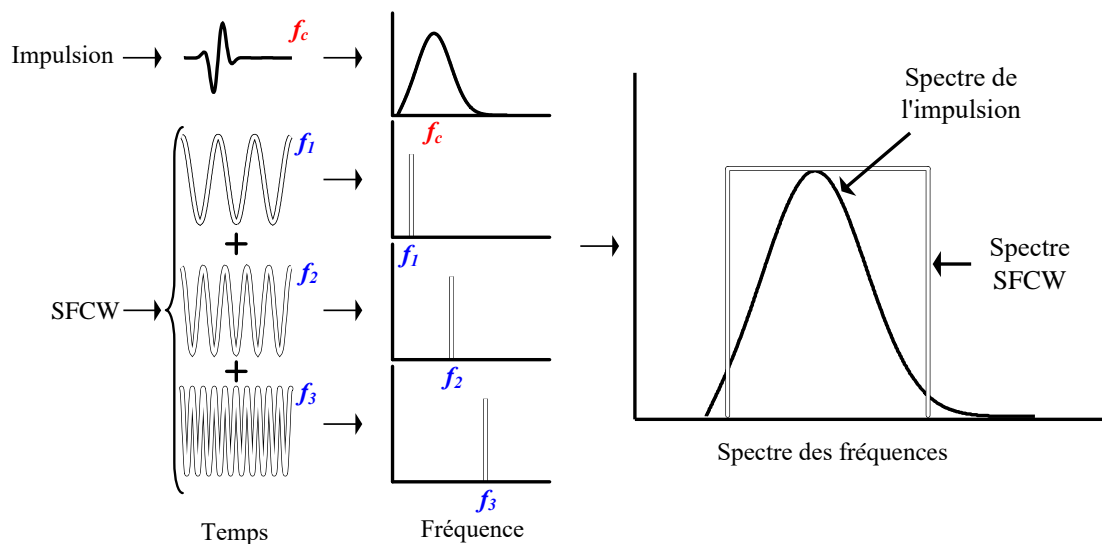


FIGURE 5.2 – Comparaison entre les spectres des systèmes SFCW et impulsionnel.

Les paramètres clés du **VNA** comme utilisé dans ces expérimentations sont listés dans le tableau 5.1. La plage dynamique typique atteignable pour la bande passante et la bande de la fréquence intermédiaire (**Intermediate Frequency Bandwidth (IFBW)**) considérée est d'environ 80 à 95 dB. En revanche, la réduction de la **IFBW** améliore la précision de la mesure en réduisant le niveau de bruit, mais allonge en contrepartie le temps d'acquisition (*sweep time*). Dans le cadre de nos mesures, le compromis qui a été trouvé est de fixer une **IFBW** de 300 Hz pour un temps d'acquisition de 2,25 s.

TABLEAU 5.1 – Résumé des paramètres clés du VNA utilisé dans les expérimentations au laboratoire.

Paramètre du VNA	Valeur
Nombre de points fréquentiels	201
Pas fréquentiel	15 MHz
Fréquence de début	300 MHz
Fréquence de fin	3,3 GHz
Largeur de la bande FI.	300 Hz
Puissance d'émission	-10 dBm

Pour acquérir un B-scan, le VNA mesure le coefficient de transmission S_{21} sur la bande passante d'intérêt avec un intervalle spatial de 0,015 m le long de la direction x . Après collection, les données fréquentielles sont d'abord transformées en B-scans (en domaine temporel) via une transformée de Fourier inverse (TFI). Ensuite, l'ensemble des techniques de post-traitement de données GPR dans le domaine temporel (développées dans le chapitre 4) est appliqué.

5.2.2 Antennes de mesures

Une antenne papillon complémentaire fractale est utilisée pour réaliser les mesures au laboratoire. Cette antenne résulte de la miniaturisation d'une antenne du même type conçue dans le cadre d'une autre application [Liu et al., 2018].

La description géométrique de notre antenne est donnée par la figure 5.3. Plusieurs facteurs ont été pris en compte lors de sa conception. D'abord, celle-ci est partiellement enfermée dans une cavité blindée en cuivre pour réduire son rayonnement arrière et la rendre unidirectionnelle. Ce blindage est également utile pour protéger l'antenne des perturbations EM extérieures. En effet, sans un tel blindage autour de l'antenne, les perturbations réduiraient considérablement le SNR des données mesurées. Toutefois, le couplage qui naît entre l'antenne et la cavité de protection détériorera inévitablement le fonctionnement de l'antenne. Dans ce sens, des absorbants sont placés à l'intérieur de la cavité afin de minimiser l'effet de ce couplage en absorbant les ondes EM et en réduisant les réflexions multiples à l'intérieur de la cavité. De plus, cette antenne est conçue avec des géométries fractales afin d'élargir la bande passante couverte. Finalement, l'antenne est pliée d'un angle de 30° afin d'améliorer sa directivité dans la bande de fréquence d'intérêt [300 MHz – 3,3 GHz]. L'idée de plier l'antenne est inspirée des antennes cornets fonctionnant en mode TEM telles qu'elles sont représentées dans Lee and Smith [2004].

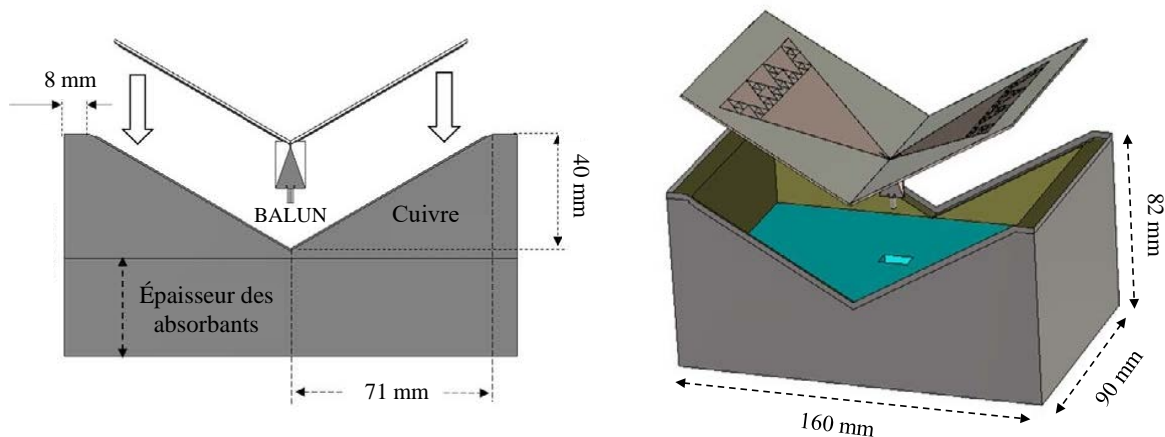


FIGURE 5.3 – Description de la conception de l'antenne papillon complémentaire fractale.

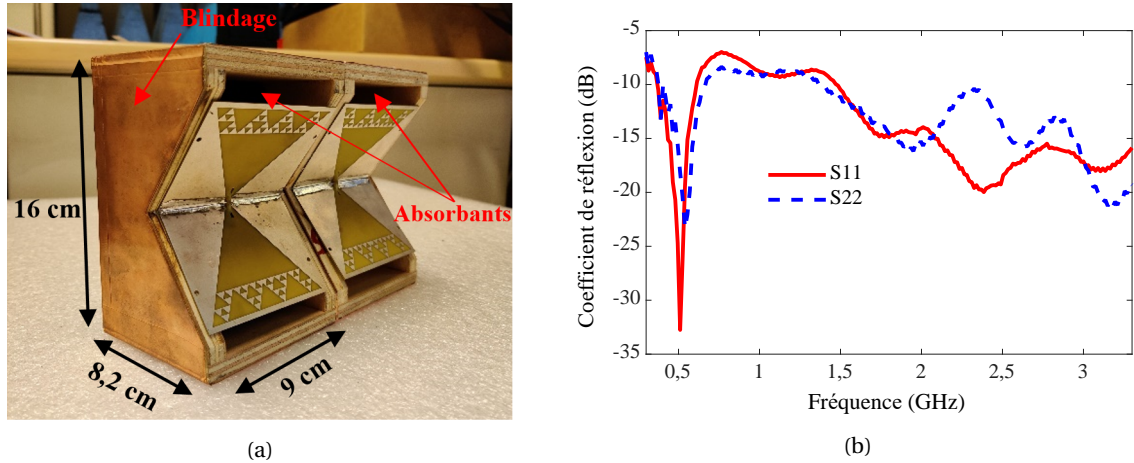


FIGURE 5.4 – (a) Antennes d’émission et de réception utilisées pour réaliser nos mesures au laboratoire, et (b) le coefficient de réflexion mesuré de nos antennes Tx et Rx.

La figure 5.4a présente la paire d’antenne utilisée dans la conduite des mesures au laboratoire. La figure 5.4b montre la mesure des coefficients de réflexion correspondants sur la plage de fréquence [300 MHz – 3,3 GHz].

5.2.3 Prototypes de racines

Les expérimentations en laboratoire ont été menées sur les deux prototypes de racines présentés dans la figure 5.5. Ces prototypes possèdent des propriétés diélectriques comparables à celles des modèles simulés dans la section 4.6 du chapitre 4, utilisés pour valider la chaîne de post-traitement proposée. Les deux prototypes sont composés de segments cylindriques en bois de même longueur ($l = 25$ cm) et sont enfouis dans le sable du bac à une profondeur de 15 cm. Les diamètres des segments du prototype B sont de 1,5 cm. En revanche, ceux du prototype A sont définis selon le modèle de Leonardo décrit dans le chapitre 3. Ces segments de bois ont été trempés dans l’eau pendant plusieurs jours avant la conduite des expériences, et ce, afin d’atteindre une permittivité diélectrique se traduisant par un contraste suffisant entre le sol et la racine.

Quelques minutes avant d’effectuer les mesures, les propriétés diélectriques des prototypes de racines ont été mesurées à l’aide d’une sonde coaxiale diélectrique du type Agilent 85070E [Agilent Technologies, 2008]. Après l’étape de l’étalonnage avec l’air et l’eau à 25 °C, la sonde 85070E a été connectée à un VNA qui mesure le coefficient de réflexion complexe du segment de bois étudié pour établir la permittivité complexe sur la bande de fréquence d’intérêt. Le résultat de la mesure est donné par la figure 5.6. Un soin particulier a été pris lors de la mesure afin d’assurer un

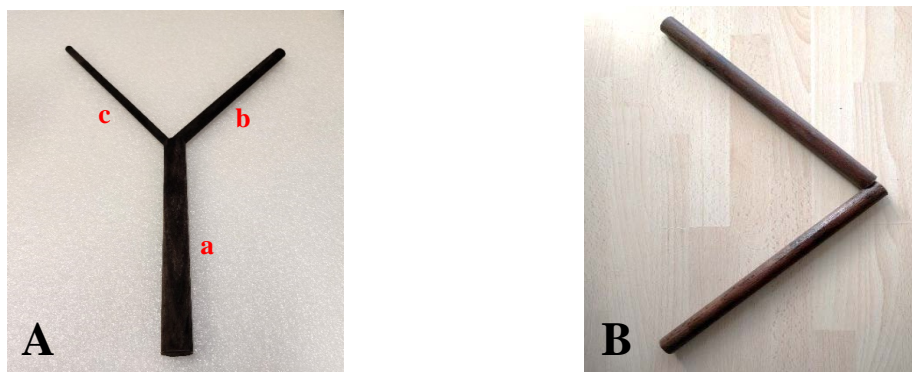


FIGURE 5.5 – Les deux prototypes racinaires considérés pour les expérimentations au laboratoire. Pour le prototype A, les diamètres des trois segments sont comme suit : $d_a = 1,9$ cm ; $d_b = 1,5$ cm ; $d_c = 1$ cm.

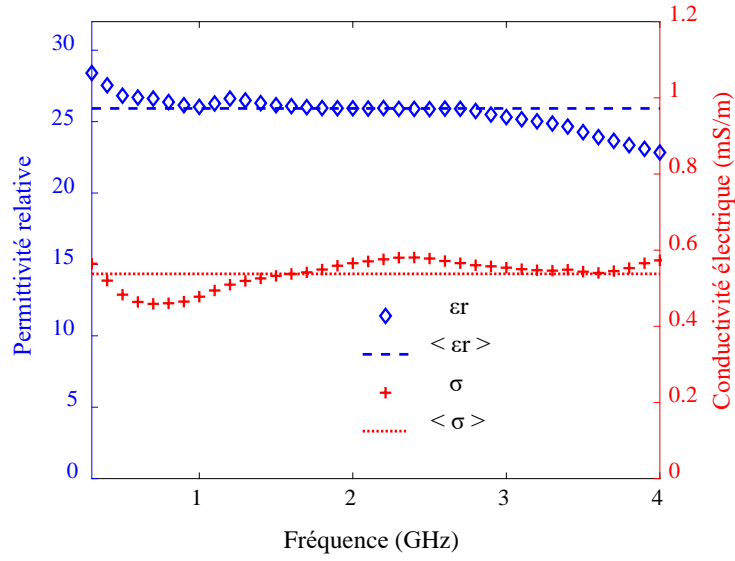


FIGURE 5.6 – Mesures des propriétés diélectriques des prototypes racinaires.

bon contact entre l'extrémité de la sonde et l'échantillon du bois étudié. Comme on peut le noter sur la figure 5.6, les propriétés diélectriques des prototypes varient légèrement sur la gamme de fréquences des mesures, avec des valeurs moyennes de : $\epsilon_r = 25,6$ et $\sigma = 0,54$ mS/m.

La précision des mesures diélectriques effectuées par la sonde 85070E est fonction du module de permittivité diélectrique comme exprimé par les équations (5.1) et (5.2) suivantes [Agilent Technologies, 2008] :

$$\epsilon' = \epsilon' \pm 0,05 |\epsilon^*| \quad (5.1)$$

$$\epsilon'' = \epsilon'' \pm 0,05 |\epsilon^*| \quad (5.2)$$

où $|\epsilon^*|$ est le module de la permittivité diélectrique donné par :

$$|\epsilon^*| = \sqrt{(\epsilon')^2 + (\epsilon'')^2} \quad (5.3)$$

5.2.4 Résultats du post-traitement

Comme mentionné précédemment, les données collectées par nos antennes sont converties dans le domaine temporel et la chaîne de post-traitement précédemment décrite est mise en œuvre. Pour illustrer, les résultats issus de deux différentes sections transversales (parties supérieure et inférieure) du prototype racinaire A ont été considérés dans la figure 5.7. La figure 5.7a présente le résultat de l'application de l'approche SVD pour réduire le niveau du clutter dans les images collectées. La méthode RHT a été appliquée par la suite afin d'estimer la permittivité relative du sol sableux utilisé dans les expériences. La figure 5.8 illustre le processus appliqué. Une valeur de $\epsilon_r = 2,5$ a été estimée.

D'autre part, comme le montre la figure 5.7a (à droite), les hyperboles issues des deux segments du prototype A ne sont pas symétriques en raison de l'angle transversal entre la ligne de scan et les segments du prototype racinaire. Ensuite, les résultats de la migration par filtrage adapté combinée avec la transformée de Hilbert sont représentés sur la figure 5.7b. Nous pouvons constater sur les figures de droite que les deux signatures ont été focalisées mais ne sont pas situées exactement à la même profondeur. Ceci peut-être expliqué par le fait que les prototypes de racines étudiés ont été placés manuellement dans le sol de l'expérience, ce qui provoque une légère différence dans la profondeur réelle. Enfin, une interpolation de type spline cubique a été effectuée pour préparer une représentation tridimensionnelle lisse et continue.

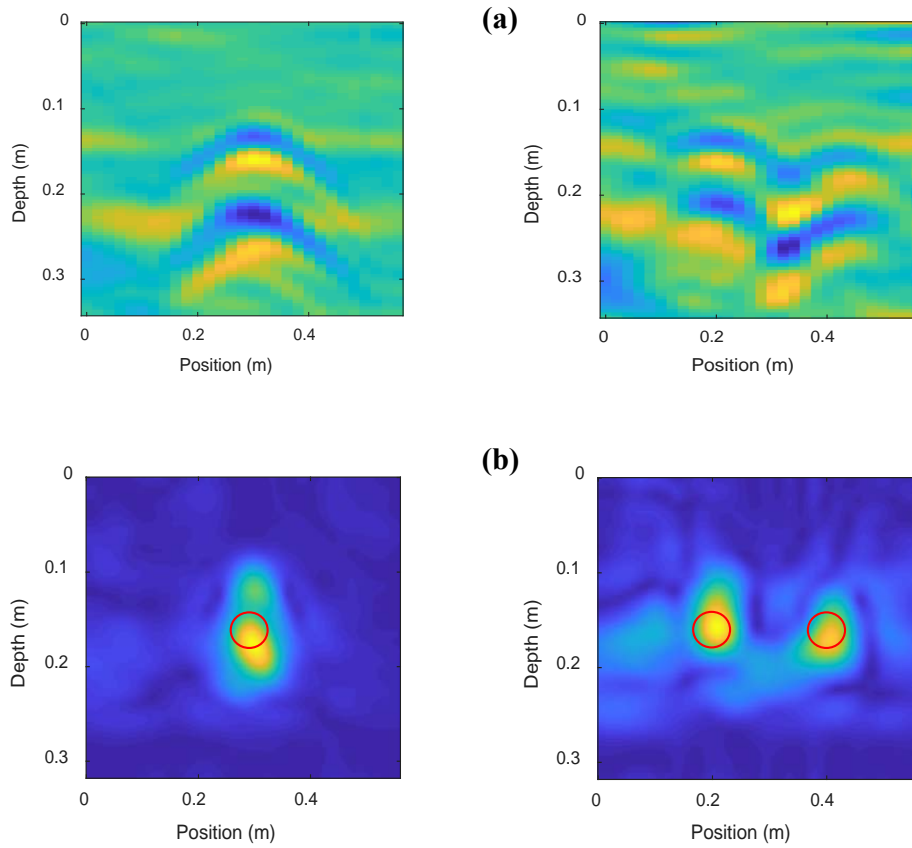


FIGURE 5.7 – Résultat des B-scans mesurés en laboratoire : partie supérieure du prototype A ($y = 0,35$ m) à droite, et partie inférieure ($y = 0,10$ m) à gauche. (a) Après pré-traitement et réduction du clutter par la SVD, et (b) après focalisation par le filtrage adapté et la transformée d'Hilbert.

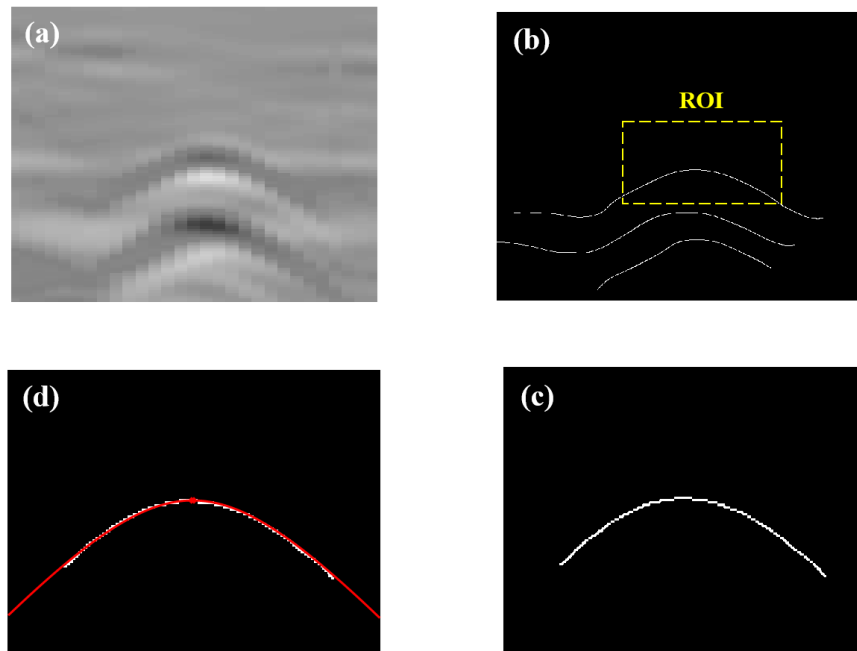


FIGURE 5.8 – Application de l'approche RHT aux données mesurées en laboratoire. (a) Une version de l'image B-scan en niveaux de gris est considérée, (b) conversion en une image binaire après extraction des bords à l'aide de l'opérateur de Canny, (c) la ROI contenant l'hyperbole d'intérêt est sélectionnée pour le traitement RHT, et (d) raccordement de l'hyperbole via les valeurs médianes des trois paramètres estimés.

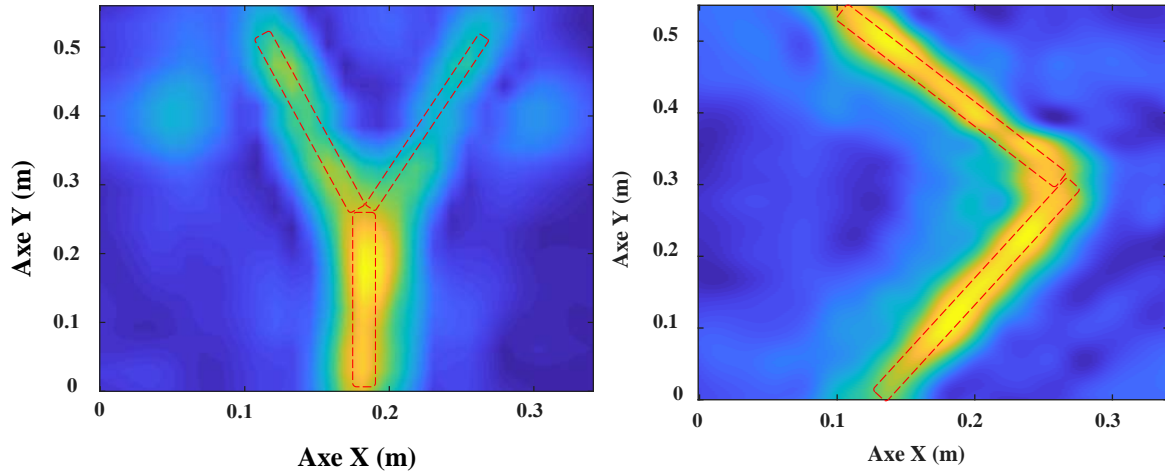


FIGURE 5.9 – C-scans des deux prototypes considérés dans les expérimentations au laboratoire : (a) prototype A, (b) prototype B.

La figure 5.9 présente les C-scans des deux prototypes A et B après l'application de notre chaîne de post-traitement proposée. Nous pouvons constater sur le C-scan du prototype A que la réflexion de la partie inférieure du prototype présente une forte amplitude par rapport aux deux autres segments. Ceci est justifié par le diamètre important de ce segment (le plus grand diamètre du prototype), mais aussi par le fait qu'il soit placé perpendiculairement à la ligne de balayage des antennes.

Il convient de souligner que le sol utilisé pour les expériences est moins hétérogène que celui modélisé dans la simulation, ce qui réduit le niveau de clutter par rapport aux résultats des simulations numériques. Ainsi, en fixant le même seuil d'intensité de pixels de la simulation numérique (de 70% de l'amplitude normalisée), les représentations tridimensionnelles des données expérimentales (figure 5.10 et 5.11) ne souffrent d'aucune inclusion parasite autour des architectures racinaires reconstruites.

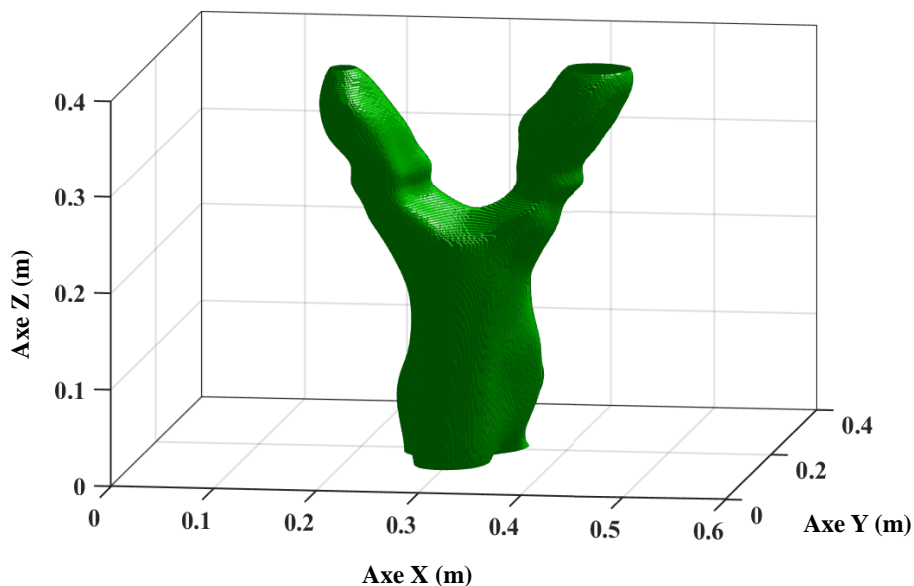


FIGURE 5.10 – Visualisation en 3-D du C-scan du prototype A.

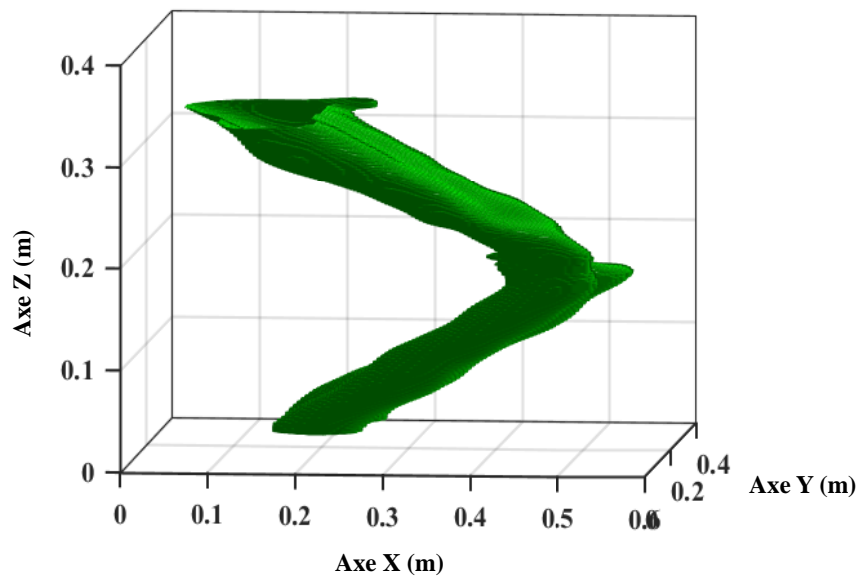


FIGURE 5.11 – Visualisation en 3-D du C-scan du prototype B.

5.3 Mesures sur le terrain

La dernière étape de validation de notre chaîne de post-traitement consiste à l'appliquer sur des données collectées sur le terrain. Dans cette section, nous présentons les mesures réalisées au cours de cette thèse pour détecter et reconstruire le système racinaire d'un arbre réel. Pour le système GPR du laboratoire -basé sur la technologie SFCW-, le temps d'acquisition représente une limitation pour mener les mesures sur des longues distances au terrain. Ainsi, ces mesures seront réalisées en utilisant un système GPR commercial disponible au laboratoire.

5.3.1 Équipement de mesure

Il s'agit d'un système GPR de type MALÅ GroundExplorer (GX) équipé de la technologie HDR qui intègre les avantages de l'échantillonnage en temps réel. Le système produit en sortie des fichiers de données (.rd7) de haute résolution sous format 32-bits avec un faible niveau de bruit. Afin de couvrir un large spectre d'applications, la société MALÅ propose des antennes avec quatre différentes fréquences centrales : 80, 160, 450 et 750 MHz. Dans notre laboratoire, nous disposons des deux antennes 450 et 750 MHz. Cependant, dans le cadre de ce travail, seule l'antenne 750 MHz a été exploitée pour réaliser les mesures sur le terrain, étant donné qu'elle fournit la résolution la plus élevée tout en atteignant la profondeur souhaitée pour notre application.

La figure 5.12 présente les équipements du système de mesure. Ce dernier se distingue par sa simplicité et sa facilité d'utilisation. En effet, le système est constitué de deux composantes (antenne et contrôleur) reliées par un seul câble (à la fois pour les données et l'alimentation). De plus, la manipulation du système sur le terrain est très aisée étant donné que chacune de ces deux composantes pèse environ 3 kg.

Partie au sol

Dans le cadre de nos mesures, l'antenne sera utilisée en mode *ground-coupled*. Une brève description des principales caractéristiques de l'antenne GX750HDR est fournie dans le tableau 5.2. L'alimentation de l'antenne est assurée par une batterie lithium-ion 12V/8,7Ah capable de tenir jusqu'à 5 heures de fonctionnement sous des conditions normales de manipulation. De plus, l'antenne est connectée à une roue codeuse (odomètre) afin de mesurer la distance parcourue et ainsi contrôler l'émission des impulsions dans le temps. La précision de la roue codeuse dépend de plusieurs facteurs comme la rugosité de la surface de mesure, la pression appliquée et l'usure. Le système permet également une géolocalisation automatique dans le site de mesures via son unité

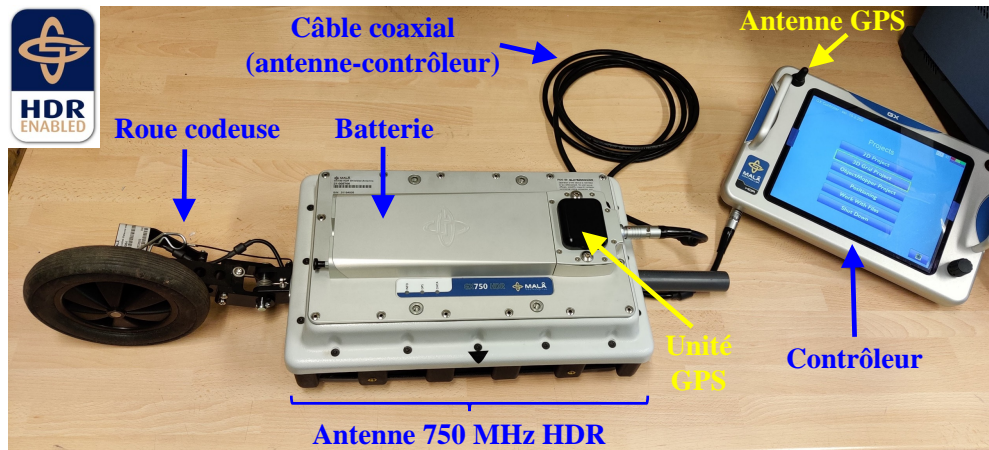


FIGURE 5.12 – Équipements du système GPR MALÅ GX750HDR.

TABLEAU 5.2 – Principales caractéristiques de l'antenne GX750HDR du système GPR MALÅ.

Caractéristique	Valeur
Fréquence centrale	750 MHz
Poids	3,6 kg
SNR	> 97 dB
Dimensions	37,5 x 23,5 x 17,0 cm
Séparation Tx-Rx	0,14 m
Fenêtre temporelle	75 ns
Courant de consommation	1,3 A

GPS. Cette dernière devient opérationnelle dès que quatre satellites ou plus sont disponibles. En sortie, le système génère un fichier (d'extension .cor) contenant les coordonnées GPS de l'antenne (latitude, longitude et hauteur) lors de chaque balayage.

Partie portée par l'utilisateur

Le contrôleur du système permet l'acquisition et la gestion des données collectées. Pour préparer la mesure, l'utilisateur se charge de définir un certain nombre de paramètres comme la distance entre les A-scans. Ce paramètre détermine par la suite la vitesse maximale de balayage du système GPR. Un autre paramètre important à fixer est la fenêtre temporelle d'acquisition (en ns) qui permet, après définition d'une valeur provisoire de la vitesse du sol, de calculer la profondeur d'investigation maximale. Notons que lors d'une mesure, les données collectées sont affichées en temps réel sur l'interface graphique du contrôleur. Enfin, le système permet à son utilisateur d'appliquer quelques traitements de base sur le terrain comme l'ajustement du contraste, ou encore la réduction de bruit pour supprimer les lignes de réflexion parallèles.

5.3.2 Principe et apport de la technologie HDR

La technologie HDR se caractérise par l'association d'une antenne très large bande avec les avantages de l'échantillonnage en temps réel et la réduction du bruit électronique par l'empilement (*hyperstacking*). La société MALÅ a intégré cette technologie au sein de ses produits depuis l'année 2013. Avant d'expliquer le principe de la technologie HDR, il convient de rappeler les deux principaux types de bruit dont souffrent les systèmes GPR [Johansson, 2016] :

- *Bruit externe* : par ex. stations radio, téléphones portables, réseaux Wi-Fi, etc. Les fabricants ont du mal à limiter l'effet du bruit externe lorsque le bruit a un contenu en fréquence dans

la bande passante de l'instrument **GPR**. En général, la réduction de ce type de bruit se fait en blindant les antennes et en limitant la bande des entrées du récepteur (dans la mesure du possible).

- *Bruit interne* : celui-ci est généré par les composants de l'instrument. Généralement, le bruit dans le circuit d'échantillonnage est dominant. Ce bruit est quelque chose que tous les fabricants s'efforcent de minimiser. Cependant, il ne peut jamais être complètement supprimé. Enfin, nous avons le plancher de bruit de fond, qui fixe une limite physique à ce que nous pouvons faire.

Les signaux **GPR** se propagent à des vitesses proches de la célérité ($c = 0,3 \text{ m/ns}$). En conséquence, les temps de parcours totaux des signaux **GPR** sont de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes. Pour cette raison, il est facile de retransmettre plusieurs fois la même impulsion **GPR** sur un court intervalle de temps. L'empilement décrit le processus consistant à calculer la moyenne d'un ensemble des signaux **GPR** répétés et collectés à la même position afin de réduire le bruit, augmenter la profondeur d'investigation, et ainsi améliorer l'interprétation des données. Ce processus est illustré dans la figure 5.13.

Essentiellement, l'empilement agit comme un moyen d'améliorer le rapport signal à bruit pour les données **GPR** collectées à un certain emplacement. Ceci est accompli non en augmentant l'amplitude du signal **GPR**, mais en diminuant l'amplitude du bruit. En effet, lorsque le bruit est moyenné, il tend vers zéro et le signal **GPR** peut être vu à des profondeurs plus importantes. L'idée de réduire le bruit aléatoire est représentée dans la figure 5.13 par la partie rouge du signal **GPR**. Notons que l'amplitude du bruit en rouge dans le signal enregistré diminue à mesure que nous empilons les signaux collectés. Il est bien connu que si : 1) le signal et le bruit sont non-corrélés, et 2) le bruit est aléatoire (blanc), alors en prenant la moyenne nous réduisons le bruit (augmentons le **SNR**) de $1/\sqrt{NP}$ où NP est le nombre de piles (*stacks*) utilisées (voir tableau 5.3) **Johansson [2016]**. A titre d'exemple, l'utilisation de 16 384 piles réduit le niveau de bruit à moins de 1% par rapport à une seule pile. Cela signifie que des signaux **GPR** faibles, jusqu'à environ 100 fois plus petits, sont désormais détectables par le système **GPR**.

La figure 5.14 illustre comment la réduction du niveau de bruit permet également d'élargir la bande passante du système de mesures. Rappelons que les signaux **GPR** sont enregistrés entre l'amplitude crête et le niveau de bruit de fond. De là, comme il est possible d'avoir des signaux **GPR** sous le plancher de bruit, cela signifie que la profondeur de pénétration augmente si le plancher de bruit diminue. Ainsi, le système équipé de la technologie **HDR** est capable d'observer des fonctionnalités plus profondes et plus subtiles comparé aux systèmes traditionnels.

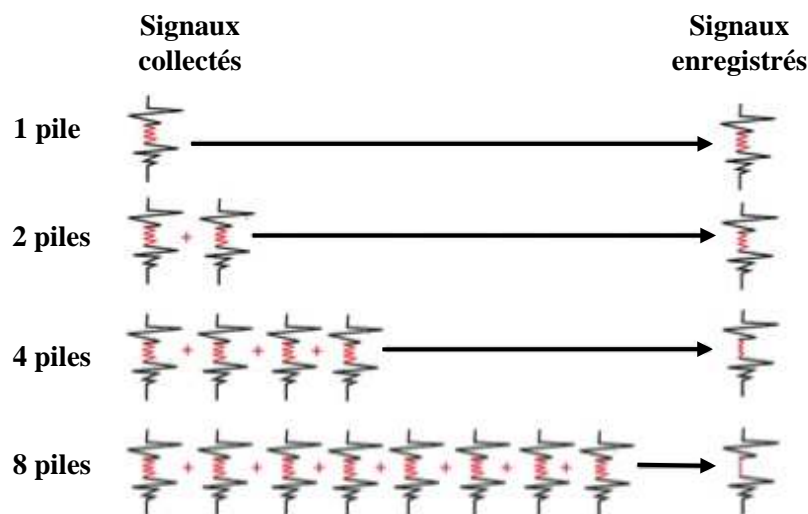


FIGURE 5.13 – Réduction du bruit aléatoire et augmentation du SNR par l'empilement des signaux GPR en collectant la même trace plusieurs fois, en calculant la moyenne et en enregistrant la trace moyenne.

TABLEAU 5.3 – La relation entre le niveau de bruit et le nombre de piles utilisées.

Nombre de piles	Bruit réduit	Bruit réduit en %
1	1/1	100%
4	1/2	50%
16	1/4	25%
256	1/16	6%
1024	1/32	3%
4096	1/64	1,6%
16 384	1/128	0,8%

En ce qui concerne le processus d'échantillonnage, jusqu'à présent les composants électroniques ne permettaient pas d'effectuer la conversion en temps réel des signaux dans la gamme de fréquence du GPR. Ainsi, pour observer des événements très rapides avec des circuits à faible coût, les systèmes traditionnels utilisent un système d'échantillonneur-bloqueur pour effectuer un changement de fréquence et rendre possible la conversion numérique. La méthode utilisée est dite échantillonnage en temps équivalent. Elle nécessite plusieurs acquisitions d'échantillonnage à différentes fréquences d'horloge. A chaque impulsion émise, le récepteur ne garde qu'un seul échantillon, il faut donc plusieurs impulsions pour reproduire la forme d'onde complète. Les échantillons prélevés des différentes acquisitions sont rassemblés et reconstruits. Le cadencement des impulsions est donné par le **Pulse Repetition Frequency (PRF)**. La fréquence minimale d'échantillonnage requise est fonction de la bande passante du signal original, c'est pourquoi cette bande passante doit être finie. Le théorème de Nyquist stipule que pour une reconstruction parfaite du signal, la fréquence d'échantillonnage (f_e) doit être le double de la bande passante (B), c'est-à-dire $B \leq f_e/2$. A titre d'illustration, l'acquisition d'un signal d'une durée de 100 ns à 512 échantillons, un PRF de 400 KHz (soit une période de 2,5 μ s), nécessite un temps de l'acquisition de $2,5 \mu\text{s} \times 512 = 1,28 \text{ ms}$.

De là, la technique de l'échantillonnage en temps équivalent peut être efficace pour capturer des événements extrêmement rapides, mais n'est pas toujours la meilleure ou la plus efficace. Aujourd'hui, les caméras vidéo modernes à grande vitesse peuvent capturer une balle en vol en temps réel. Par analogie, l'échantillonnage en temps réel peut aujourd'hui également capturer une réflexion radar ultra-rapide complète à la fois avec précision et à moindre coût. Ainsi, ce processus permet à la technologie HDR de faire l'acquisition de nombreux points au lieu d'un seul pour un cycle d'horloge. Dans le passé, ces techniques étaient coûteuses et beaucoup trop gourmandes en

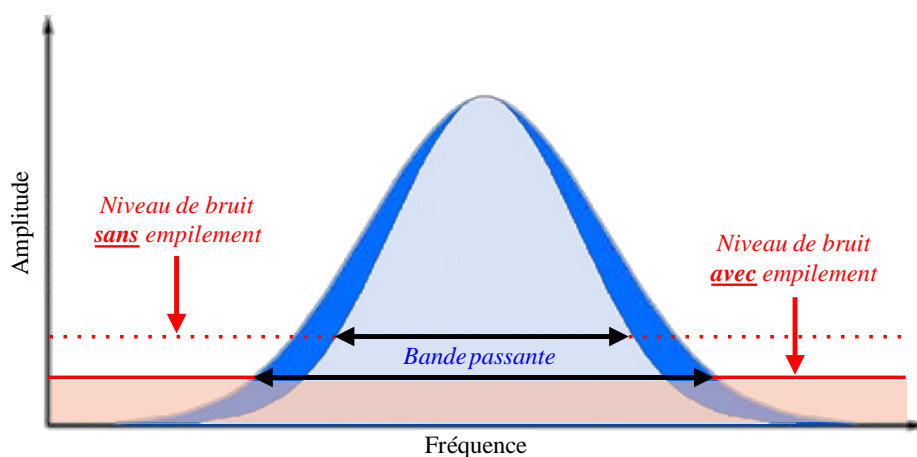


FIGURE 5.14 – Effet de la réduction du niveau de bruit sur le spectre GPR.

énergie, mais les progrès récents de la technologie des circuits intégrés ont permis le développement de dispositifs à faible coût qui fonctionnent à des vitesses raisonnablement élevées tout en consommant des quantités d'énergie relativement faibles.

Grâce à l'échantillonnage en temps réel, le SNR peut être amélioré de plus de 30 dB. Plus de détails sur les avantages de l'échantillonnage en temps réel par rapport à l'échantillonnage en temps équivalent peuvent être trouvés dans l'article Feigin [2015]. Si l'on reprend l'exemple précédent, le temps d'acquisition passe à 13,5 μ s, soit ~ 93 fois plus rapide avec une antenne HDR. Étant donné que les systèmes GPR qui se basent sur l'échantillonnage en temps réel réalisent des acquisitions des dizaines de fois plus rapidement que les systèmes conventionnels, l'opération d'empilement n'affecte pas la vitesse de collecte de données.

Pour récapituler, l'apport de la technologie HDR dans les mesures GPR par rapport aux systèmes traditionnels peut être résumé dans les cinq points suivants :

1. une vitesse d'acquisition nettement plus importante,
2. un meilleur rapport signal / bruit,
3. une bande passante élargie,
4. une meilleure plage dynamique et résolution,
5. une profondeur de détection accrue.

Les technologies employées dans l'HDR sont assez anciennes et ont été utilisées depuis longtemps dans les produits audio pour améliorer les performances; elles reposent sur une base physique solide. Cependant, il n'a pas été pratique d'appliquer ces méthodes aux données GPR jusqu'à récemment en raison du manque de dispositifs de numérisation suffisamment rapides. Enfin, il convient de noter que les avantages de la technologie HDR sont plus prononcés dans les applications GPR à basses fréquences ($f_c < 1$ GHz) impliquant des sols saturés. Dans de telles conditions, le système GPR et le sol présentent suffisamment de pertes pour faire ressortir les avantages de l'empilement.

5.3.3 Directives sur la collecte de données GPR autour d'arbres réels

Dans le but d'optimiser la qualité des mesures GPR effectuées sur le terrain pour étudier le système racinaire d'arbres réels, nous partageons dans cette section un ensemble de directives à suivre. Ces dernières sont le fruit de l'expérience de mesures menées dans ce travail de thèse :

1. Afin d'optimiser l'acquisition de données GPR sur le terrain, il est important de dégager la zone à scanner avec le système de tout débris de surface (c'est-à-dire, des cailloux, des branches, etc.). Ceci permet à l'antenne d'être facilement tirée le long d'un B-scan.
2. Pour tester la capacité du système de mesure à détecter les racines dans une zone particulière, nous recommandons de commencer par effectuer un premier scan circulaire autour de l'arbre. Comme le système de mesure permet de visualiser les données collectées en temps réel, il est facile de constater la présence ou l'absence des réflexions hyperboliques au cours de la mesure.
3. Après avoir identifié la zone d'où proviennent les réflexions hyperboliques, l'étape suivante consiste à changer le rayon en s'approchant et/ou en s'éloignant du tronc de l'arbre pour réaliser une nouvelle mesure. Si l'on distingue toujours la présence des hyperboles, alors cela peut confirmer qu'il s'agit très probablement des réflexions racinaires et non pas d'objets indésirables.
4. Finalement, la définition et le respect des points de début et de fin de chaque balayage à effectuer, permet d'avoir des B-scans comparables lors du traitement des données et facilite la reconstruction tridimensionnelle du système racinaire.

5.3.4 Site de mesures

Les mesures terrain ont été effectuées dans un parc ($48^{\circ}42'31.3''$ N, $2^{\circ}9'57.9''$ E) au sein du campus de CentraleSupélec. La végétation principale de ce parc est constituée essentiellement de pins et de peupliers; leurs racines sont toutes ligneuses. La figure 5.15 montre la localisation de ce site de mesures. L'arbre dont le système racinaire a été étudié est un peuplier avec des touffes de gui blanc (*Viscum album*), d'environ 24 m de hauteur et d'un diamètre de tronc à hauteur de poitrine d'environ 60 cm. Comme montré sur les figures 5.17 et 5.16, les mesures ont été effectuées selon une grille carrée de $4,2 \times 4,2 \text{ m}^2$ à une distance de 0,5 m du tronc de l'arbre. Ceci divise la région à prospecter en quatre zones identiques nommées de A à D. Comme nous n'avons aucune idée sur l'orientation des racines de l'arbre étudié, les zones éloignées du tronc (AD, DC, CB et BA) ont été scannées dans deux directions perpendiculaires. Ceci permet de couvrir la plage de détection des racines efficace de $[45^{\circ} - 135^{\circ}]$ quelle que soit l'orientation des racines.

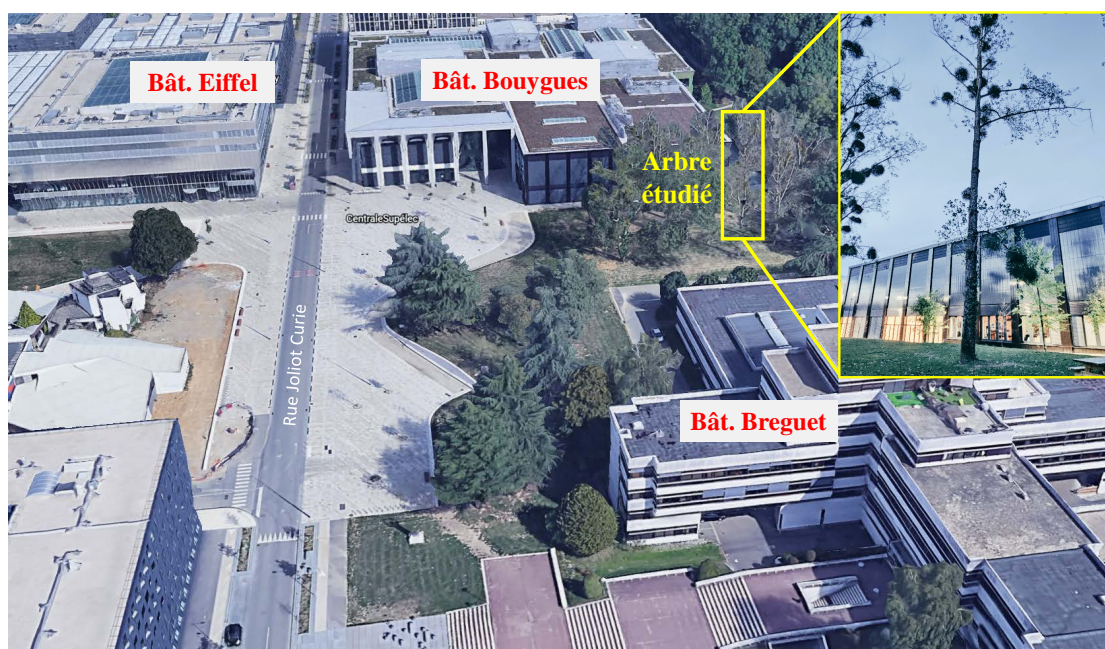


FIGURE 5.15 – Vue satellite montrant la localisation du site de mesures au sein du campus de CentraleSupélec (source : Google Earth). L'arbre étudié est situé entre les bâtiments Bouygues et Breguet.

Outre le fichier de données collectées, le système fournit à la fin de la mesure un autre fichier (.rad) contenant toutes les caractéristiques du balayage effectué (distance parcourue, nombre d'échantillons temporels et spatiaux, fenêtre temporelle, ...). Ces éléments sont indispensables pour réaliser le post-traitement des données sur MATLAB. Le tableau 5.4 résume les principales caractéristiques des B-scans collectés dans le cadre de nos mesures.

TABEAU 5.4 – Caractéristiques des B-scans collectés dans le cadre de nos mesures terrain.

Paramètre	Valeur
Fenêtre temporelle	30 ns
Nombre de B-scans par zone	25
Distance entre les B-scans	5 cm
Vitesse de balayage maximale	1,7 m/s
Intervalle spatial entre les A-scans	0,425 cm
Nombre d'échantillons temporels dans un A-scan	290
Intervalle temporel entre les échantillons d'un A-scan	0,1042 ns

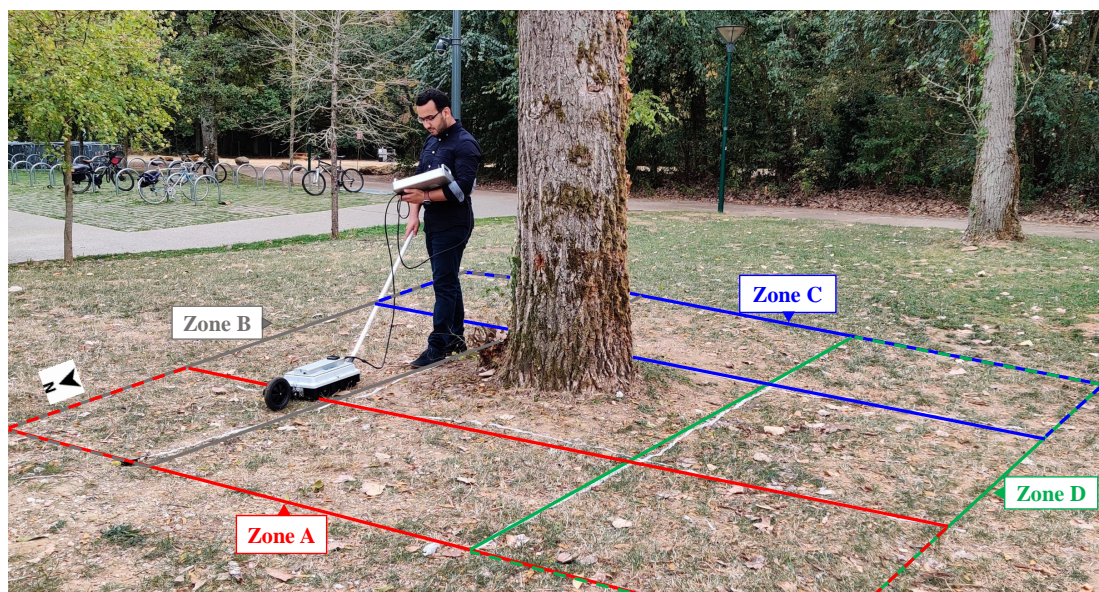


FIGURE 5.16 – Collection des données GPR sur le terrain à l'aide du système MALA GX750HDR.

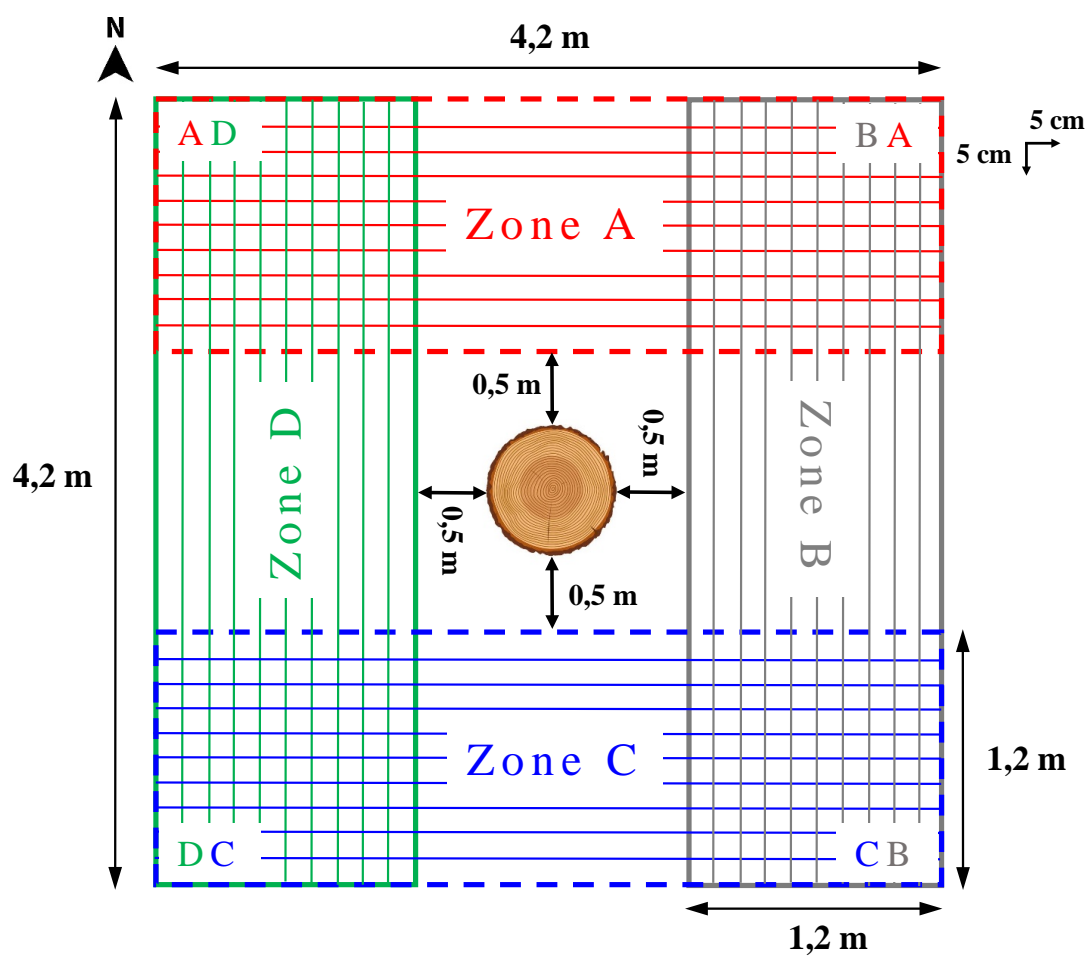
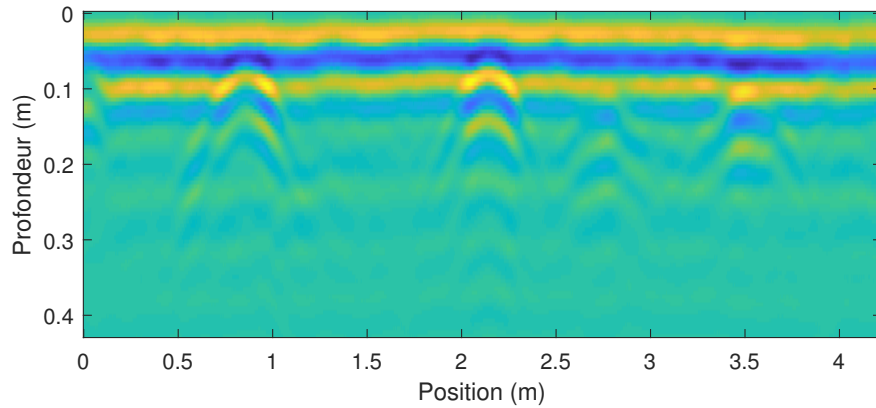


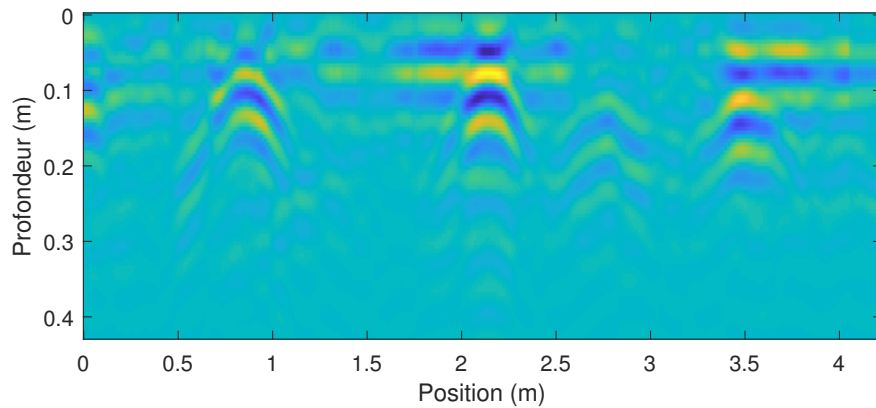
FIGURE 5.17 – Plan de mesures GPR centré autour du tronc de l'arbre étudié. Les lignes horizontales et verticales correspondent aux parcours des B-scans collectés.

5.3.5 Résultats du post-traitement

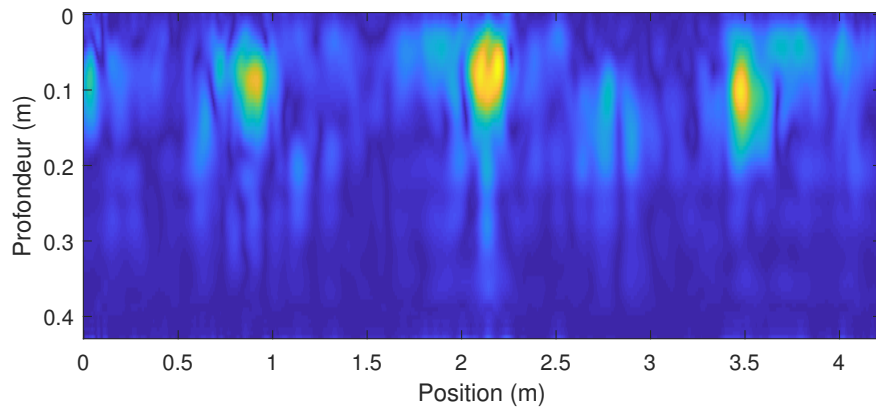
Dans la figure 5.18a, un exemple de B-scan brut issu de la zone B est présenté (correction de temps-zéro appliquée). Trois réflexions hyperboliques importantes sont clairement visibles sur ce radargramme aux positions horizontales $x = 0,8$ m; $x = 2,2$ m; $x = 3,5$ m; plus une quatrième réflexion à $x = 2,7$ m présentant un contraste diélectrique plus faible avec le sol. Après application de l'approche SVD pour éliminer le clutter (suppression des deux premières valeurs singulières), nous obtenons l'image de la figure 5.18b montrant les signatures racinaires avec un minimum de



(a) B-scan brut présentant trois réflexions racinaires.



(b) Réduction du clutter par l'approche SVD.



(c) Résultat final de l'application de la chaîne de post-traitement proposée.

FIGURE 5.18 – Exemple de post-traitement d'un B-scan collecté dans la zone B par le système MALÅ.

réflexions indésirables. Notons que les trois hyperboles sont proches de la surface du sol. Néanmoins, grâce à l'approche [SVD](#), les réflexions horizontales ont pu être éliminées sans pour autant supprimer le signal utile (issu des racines).

D'autre part, la méthode [RHT](#) a été appliquée pour déterminer la permittivité relative du sol de la mesure. Le processus a été appliqué à plusieurs B-scans issus des quatre différentes zones prospectées. La valeur estimée de la permittivité relative du sol varie légèrement autour de $\epsilon_r = 9$ pour les différents B-scans testés. Nous avons ainsi considéré cette valeur pour la suite de notre traitement. De plus, la séparation entre les antennes Tx-Rx indiquée par le constructeur du radar ($SP = 0,14$ m) a été prise en compte dans le calcul du retard T_r (temps de propagation de l'onde [EM](#) entre l'antenne et la racine) dans le processus du filtrage adapté (voir l'équation [4.41](#)). La figure [5.18c](#) présente le résultat final après application de la chaîne de post-traitement complète au B-scan de la zone B considéré. Nous obtenons ainsi trois signatures focalisées situées à une profondeur de 10 cm approximativement.

En analysant les conditions de sol du terrain de mesure, nous avons noté que les premiers centimètres du sol sont légèrement humides. Ce qui était favorable à la réalisation de la mesure et a permis d'avoir un contraste de propriétés diélectriques suffisant et des réflexions hyperboliques de racines plus claires et plus faciles à distinguer. Ceci peut également être dû à une teneur en eau importante dans les racines, ce qui augmente leur constante diélectrique par rapport au sol environnant. De plus, les arbres voisins de notre arbre étudié se situent à des distances lointaines comme le montre le schéma du parc de mesures présenté dans la figure [5.19](#). Ceci assure que les racines détectées dans la zone prospectée appartiennent toutes à l'arbre étudié, et qu'aucune interconnexion des racines des autres arbres n'est possible.

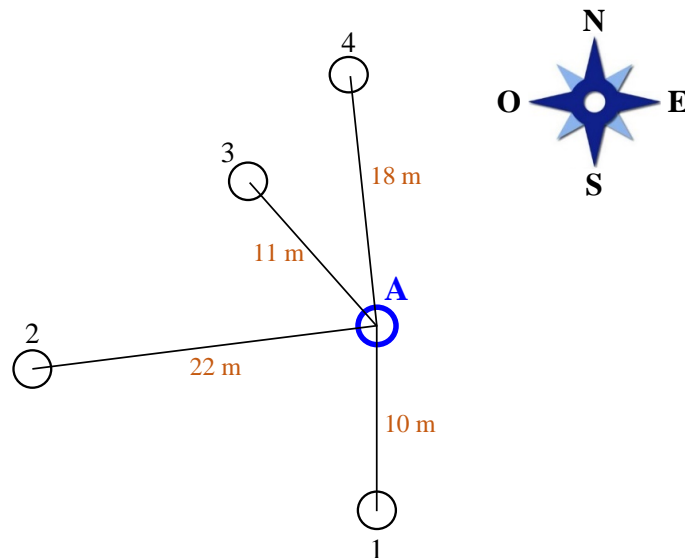


FIGURE 5.19 – Position des arbres voisins (de 1 à 4) par rapport à l'arbre étudié (A).

Après avoir analysé l'ensemble des B-scans collectés, il s'avère que les racines de l'arbre étudié sont majoritairement concentrées dans l'intervalle de profondeur de $[5 - 20]$ cm. La profondeur maximale des racines détectées avec notre système [GPR](#) est de 31 cm. Afin de reconstruire l'architecture racinaire de cet arbre sous forme d'un C-scan et avoir une représentation plus parlante de la cartographie des racines dans le sous-sol, une interpolation de type spline cubique a été effectuée entre les différents B-scans pour chaque zone. Le résultat de la reconstruction est présenté dans les figures [5.20](#) et [5.21](#). Nous avons opté ici pour une représentation en binaire en fixant un seuil d'amplitude après la procédure de migration. En effet, les images finales ont été toutes normalisées à l'unité et un seuil de 70% a été fixé.

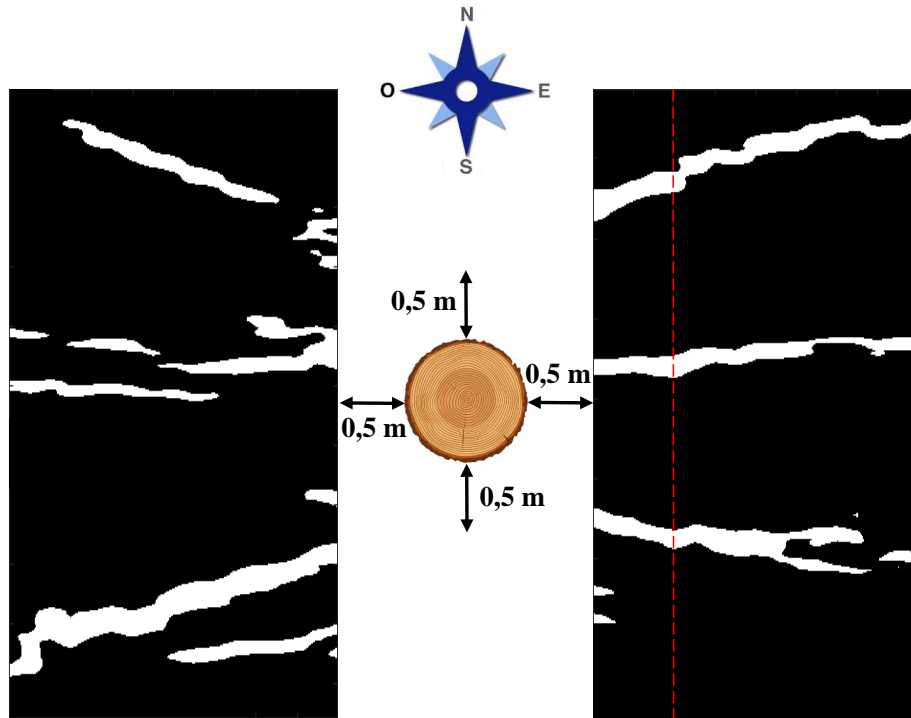


FIGURE 5.20 – Résultat de la reconstruction de l’architecture racinaire de l’arbre étudié à une profondeur de 10 cm (zones **B** et **D**) via la chaîne de post-traitement GPR proposée.

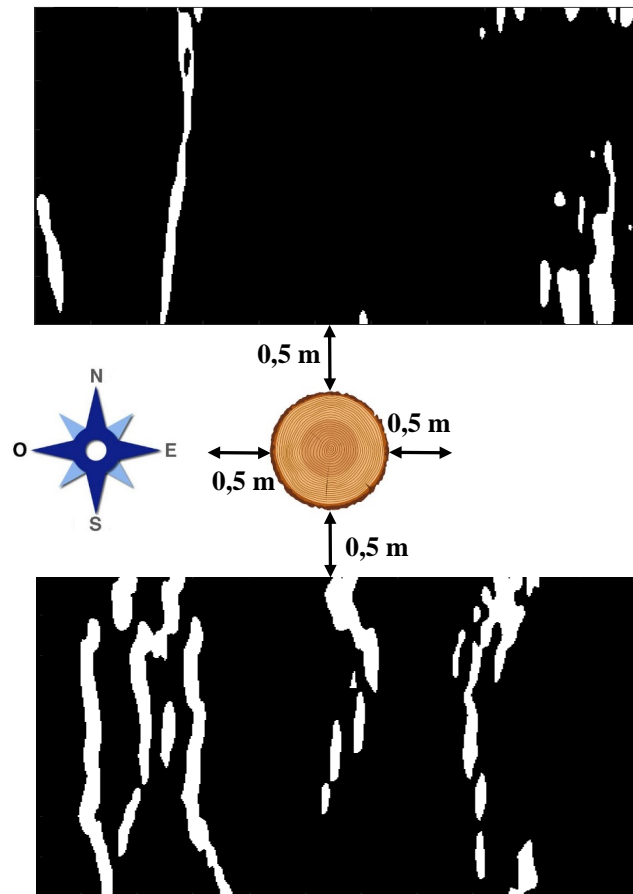


FIGURE 5.21 – Résultat de la reconstruction de l’architecture racinaire de l’arbre étudié à une profondeur de 10 cm (zones **A** et **C**) via la chaîne de post-traitement GPR proposée.

L'exemple de B-scan présenté précédemment dans la figure 5.18 provient de la ligne rouge en pointillés montrée sur la figure 5.20. Si l'on revient à l'image de la figure 5.18c, nous pouvons constater que le module de la signature du milieu ($x = 2,2$ m) est plus fort que celui des deux autres signatures. En observant le résultat de la reconstruction de l'architecture racinaire dans la zone B (figure 5.20), on comprend que cela est dû au fait que la racine du milieu est perpendiculaire à la ligne de scan GPR.

Comme nous pouvons le remarquer sur les figures 5.20 et 5.21, une discontinuité des racines est visible dans certaines parties de la reconstruction. Cela peut-être expliqué par :

- la présence d'une humidité plus élevée ou d'une forte concentration d'argile dans certaines zones du sous-sol [Tosti et al., 2016] ;
- le développement vertical des racines (racines orientées vers le bas).

Enfin, d'après les résultats de la cartographie racinaire obtenue, il s'avère que l'arbre sous test développe trois grosses racines orientées dans la direction Est (zone B) et trois autres dans la direction Ouest (zone D). Il s'agit donc d'un arbre dont les racines sont assez peu profondes mais qui se développent de façon horizontale, assurant ainsi la stabilité de l'arbre.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'intégralité des mesures expérimentales menées dans ce travail de thèse. A travers ces expérimentations, nous avons pu confirmer la viabilité de notre chaîne de post-traitement pour reconstruire l'architecture racinaire des arbres à partir des données GPR. Le système du laboratoire a fait appel à des antennes papillon complémentaires fractales précédemment développées en son sein. Les mesures ont été effectuées dans le domaine fréquentiel via les paramètres S des antennes avant de revenir dans le domaine temporel pour appliquer les techniques de traitement développées. Compte tenu des facteurs limitant la détection des racines par GPR (diamètre, teneur en eau, orientation, etc.), les deux prototypes ayant les architectures de base pour former tout système racinaire ont été reconstruits avec un degré acceptable de résolution.

En raison du temps d'acquisition conséquent du système GPR du laboratoire, les mesures sur les racines d'arbres réels sur le terrain ont été effectuées à l'aide du système GPR MALÅ équipé de la technologie HDR. Cette dernière constitue une réelle avancée de la méthode GPR grâce aux avantages multiples qu'elle offre à son utilisateur. Les résultats des traitements appliqués aux données collectées ont démontré la capacité du système GPR dans la détection des racines réelles au sein d'un sol naturel (hétérogène). L'efficacité des techniques proposées dans la chaîne de post-traitement a été également illustrée par la même occasion. Il s'agit donc d'un moyen rapide et efficace pour suivre et analyser l'évolution des racines d'arbres réels dans le temps et l'espace, et une alternative prometteuse par rapport aux méthodes destructives.

Bibliographie

- Agilent Technologies [2008]. Agilent 85070E, Dielectric Probe Kit, 200 MHz to 50 GHz, Technical Overview, 5989-0222EN, USA. 129, 130
- Feigin, J. R. [2015]. Realization of time-domain ultra wideband ground-penetrating radar using high speed accumulation and interpolated sampling. US Patent 9,057,782. 137
- Johansson, B. [2016]. High Dynamic Range (HDR) Technology Explained, <https://www.malagpr.com.au/hdr-technology-explained.html>. 134, 135
- Lee, R. T. and Smith, G. S. [2004]. A design study for the basic TEM horn antenna, *IEEE Antennas and Propagation Magazine* **46**(1) : 86–92. 128
- Liu, X., Serhir, M. and Lambert, M. [2018]. Detectability of junctions of underground electrical cables with a ground penetrating radar : Electromagnetic simulation and experimental measurements, *Construction and Building Materials* **158** : 1099–1110. 128
- Tosti, F., Benedetto, A., Ciampoli, L. B., Lambot, S., Patriarca, C. and Slob, E. C. [2016]. GPR analysis of clayey soil behaviour in unsaturated conditions for pavement engineering and geoscience applications, *Near Surface Geophysics* **14**(2) : 127–144. 143
- Yarovoy, A. G., Zhuge, X., Savelyev, T. G. and Ligthart, L. P. [2007]. Comparison of UWB technologies for human being detection with radar, *2007 European Microwave Conference, Munich*, IEEE, pp. 1574–1577. 126

Conclusion générale et perspectives

Les arbres sont des éléments fondamentaux de l'histoire humaine dans ses dimensions matérielles et culturelles. Leurs racines jouent un rôle central tout au long de leur vie. Elles assurent la fixation physique de l'arbre, absorbent l'eau et transportent les nutriments du sol, tout en contribuant de manière significative au bilan carbone de l'écosystème terrestre. Au cours des deux dernières décennies, et en raison du changement climatique, l'estimation des caractéristiques des architectures racinaires permettant l'évaluation de la stabilité des arbres et le contrôle de leur santé consiste en un défi de plus en plus important. À cela s'ajoute le conflit des systèmes racinaires des arbres avec les installations humaines, et en particulier avec les infrastructures routières. Cette problématique est souvent à l'origine de dommages importants, tels que le soulèvement et la fissuration des trottoirs et des routes, qui pourraient compromettre gravement la sécurité des biens et des personnes.

Le travail mené dans cette thèse s'inscrit dans ce cadre. Il a permis d'évaluer la potentialité de la méthode [GPR](#) pour cartographier la distribution des systèmes racinaires dans un environnement hétérogène, surveiller leur évolution spatio-temporelle, et étudier leurs multiples interactions avec le sol. Cette thèse se consacre plus particulièrement au développement d'une procédure de traitement permettant la reconstruction des architectures de racines en 3-D à partir de données [GPR](#).

Pour atteindre notre objectif, nous avons divisé ce travail en plusieurs étapes :

- En premier lieu, après avoir rappelé le principe de fonctionnement du [GPR](#), il a été nécessaire de comprendre les mécanismes de propagation des ondes [EM](#) dans un environnement complexe et hétérogène tel qu'un sol naturel. Pour cela, l'utilisation du logiciel *open-source* `gprMax` basé sur la méthode [FDTD](#) a été proposée afin de réaliser les simulations numériques nécessaires.
- En deuxième lieu, nous avons analysé la nature des systèmes racinaires, leurs architectures et morphologies, les facteurs affectant leur développement, et les différents problèmes qu'ils causent à leur environnement. À l'exception des arbres qui poussent dans des régions sèches (ex. déserts), le système racinaire se développe généralement de façon horizontale et sa profondeur ne dépasse souvent pas les deux premiers mètres du sol, avec plus de 70% des racines concentrées dans les premiers 60 cm (car sont souvent humides et riches en nutriments). À partir des analyses menées dans cette partie du travail, nous avons pu justifier le choix de la méthode [GPR](#) pour étudier les systèmes racinaires des arbres. Un état de l'art concernant les différentes méthodes (destructives et non-destructives) rencontrées dans la littérature (y compris la méthode [GPR](#)) a été également présenté. Contrairement aux applications de déminage où les antennes [GPR](#) ne peuvent pas être posées au sol (pour des raisons de sécurité), l'imagerie des systèmes racinaires permet l'utilisation de la configuration *ground-coupled* qui assure une meilleure transmission d'énergie au sol et une profondeur de pénétration plus importante.
- Nous nous sommes ensuite intéressés aux multiples facteurs qui limitent la détection des racines par la méthode [GPR](#). Parmi ces facteurs, certains sont liés aux racines et d'autres au sol environnant. Dans la suite de notre travail, il a été nécessaire d'évaluer l'impact des principaux facteurs déterminants dans la détection des racines afin d'être conscient de la limite de ce que nous pouvons atteindre en termes de précision et de résolution. Pour cela, l'outil

de simulation a été très utile, mais il a fallu, avant tout, mettre en place des modèles **EM** réalistes de racines et de sol avec des entrées adaptées à notre simulateur. Cette modélisation nous a permis également de réaliser une étude paramétrique pour évaluer la détectabilité des racines par **GPR** dans des conditions déterminées, selon leurs diamètres et teneurs en eau. Les conclusions tirées de cette étude ont servi pour guider la suite des simulations numériques effectuées, ainsi que les mesures expérimentales réalisées en laboratoire. Dans la figure C.1, nous résumons l'effet de chaque facteur sur le signal **GPR** de sortie.

- Nous avons ensuite présenté les techniques de traitement proposées afin de reconstruire les architectures de racines en 3-D à partir des données **GPR**. La chaîne de traitement développée repose essentiellement sur la technique de la **SVD** pour réduire le clutter, la transformée de Hough et le filtre de Canny pour extraire la permittivité relative du sol, et enfin le filtrage adapté combiné à la transformée d'Hilbert comme technique de migration. Sachant que l'approche proposée s'appuie sur l'hyperbole de réflexion issue de la racine pour déduire la permittivité relative du sol, elle devient particulièrement intéressante dans le cas des sols hétérogènes. D'ailleurs, très peu d'études se sont intéressées à l'évaluation de la permittivité du sol lorsque ce dernier présente une forte hétérogénéité. Dans l'objectif de valider notre approche, nous l'avons appliquée à des modèles de racines (avec des teneurs en eau situées au-dessus du **PSF** pour assurer un contraste diélectrique suffisant avec le sol) simulés sur **gprMax**. En sortie, des résultats de reconstruction 3-D avec un degré acceptable de résolution ont été obtenus.
- En dernier lieu, nous avons présenté l'ensemble des expérimentations effectuées dans le cadre de cette thèse. D'abord, des mesures dans un environnement contrôlé au laboratoire ont permis de valider la procédure de traitement proposée avec des données de mesures effectuées sur des prototypes de racines en 3-D. La collection de données repose sur la mesure des paramètres **S** d'une paire d'antennes de type papillon complémentaire fractale développée au préalable en laboratoire et fonctionnant dans la gamme fréquentielle de [300 MHz – 3,3 GHz]. Puis, une étude terrain visant à reconstruire l'architecture racinaire d'un arbre situé dans le parc du campus CentraleSupélec est présentée. Ce travail a fait appel d'un côté

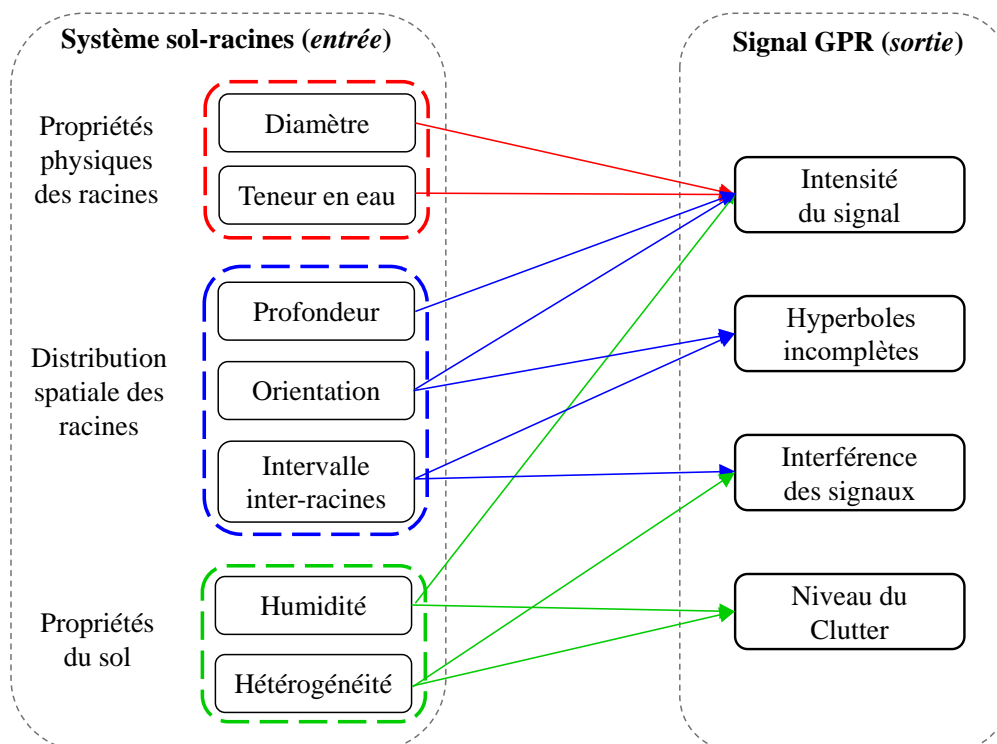


FIGURE C.1 – Effets des facteurs limitant la détection des racines par GPR sur le signal de sortie.

à un système GPR de type MALÅ GroundExplorer employant des antennes 750 MHz équipées de la technologie HDR pour la collection des données, et d'un autre côté à notre chaîne proposée pour leur traitement. Appliquée dans le domaine du GPR, la technologie HDR assure à travers les techniques de l'empilement et l'échantillonnage en temps réel, un meilleur rapport signal à bruit et une plage dynamique et résolution plus importantes. À la fin du manuscrit, le résultat de la reconstruction du système racinaire de l'arbre étudié a été présenté.

Malgré le potentiel prometteur de l'approche GPR pour étudier les systèmes racinaires, celle-ci présente encore certaines limitations dans ses applications *in situ* :

- La précision et la qualité des données GPR dépendent fortement de l'état du sol prospecté. Ainsi, il devient difficile -en hiver par exemple- d'assurer un contraste sol-racines suffisant en raison de l'humidité importante du sol.
- La direction des scans impacte la précision des résultats de manière significative et peut être un obstacle à la détection des racines dans certaines situations.
- La collection des données GPR sur le terrain dans l'objectif de réaliser des reconstructions 3-D (C-scans) peut prendre un temps considérable. Il est donc intéressant de penser au développement d'un réseau d'antennes (système GPR multi-statique) permettant d'accélérer le temps d'acquisition des données sur de longs parcours sur le terrain.
- Dans le cas où des arbres voisins sont présents à proximité de l'arbre étudié, il devient difficile d'identifier les réflexions GPR issues de chaque système racinaire du fait de la possibilité d'interconnexion des racines au sein du sous-sol.

En plus des points que nous venons de citer, l'approche que nous proposons pour estimer la permittivité relative du sol nécessite l'intervention humaine pour sélectionner la région d'intérêt (ROI) contenant l'hyperbole qui sera traitée dans la suite de l'algorithme. Nous souhaitons que cette étape soit réalisée par l'algorithme lui-même afin de rendre notre chaîne entièrement automatique. Dans cette optique, l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique (*Machine Learning*) ont été utilisés pour identifier et classer correctement les objets dans différentes disciplines. Une approche similaire peut être adoptée afin d'automatiser la procédure de sélection des hyperboles associées aux racines en analysant les images GPR par les méthodes de l'intelligence artificielle.

Pour approfondir notre compréhension de l'effet de l'hétérogénéité du sol sur les données GPR, nous sommes en train de développer une approche d'apprentissage automatique permettant d'estimer, à partir des A-scans calculés, les propriétés des racines enfouies dans des sols homogènes et hétérogènes en simulation. Les propriétés qui seront estimées sont : la profondeur, le diamètre et la teneur en eau de la racine. L'approche en cours de développement fera appel aux modèles diélectriques proposées dans le chapitre 3 de cette thèse (Maxwell-Garnett et Straube) qui lient le diamètre et la teneur en eau des racines à leur propriétés EM. Un nombre important de scénarios (~ 3000 à 4000) sera simulé à l'aide d'une carte GPU disponible au laboratoire. Les différents scénarios impliqueront différentes valeurs de profondeurs, de diamètres et de teneur en eau distribuées aléatoirement selon une loi normale. Une approche du type **Principal Component Analysis (PCA)** sera appliquée comme première étape de traitement afin de réduire la dimension des A-scans et ainsi faciliter leur manipulation avant de les communiquer à l'algorithme d'apprentissage automatique. Enfin, une autre perspective à ce travail de recherche consiste à étendre l'algorithme du filtrage adapté en traitement 3-D. En prenant en compte l'information sur la troisième dimension (direction perpendiculaire à celle du scan), cela devrait améliorer la résolution de la signature issue de la racine.

Annexe A

TABLEAU 5.5 – Formules utilisées pour calculer la fraction volumique de chaque inclusion de la racine.

Au-dessous du PSF	Au-dessus du PSF
$V_{wc} = \frac{M_{wc}}{\rho_{wc}}$	$V_{ws} = V_{wc} + V_{bw} = \frac{M_{wc}}{\rho_{wc}} + \frac{M_{bw}}{\rho_w} \quad (M_{bw} = 0,3 M_{wc})$
$V_{bw} = \frac{M_{bw}}{\rho_w} = M_{wc} \times \frac{TE}{\rho_w}$	$V_{fw} = V_{tw} - V_{bw} = \frac{M_{wc} TE}{\rho_w} - \frac{M_{bw}}{\rho_w}$
$V_a = V_t - V_{wc} - V_{bw}$	$V_a = V_t - V_{ws} - V_{fw}$
$V_t = \frac{\pi d^2 l}{4}$	$V_t = \frac{\pi d^2 l}{4}$
$TE = \frac{M_{bw}}{M_{wc}}$	$TE = \frac{M_{tw}}{M_{wc}} = \frac{(M_{fw} + M_{bw})}{M_{wc}}$
$\theta_{wc} = \frac{V_{wc}}{V_t}$	$\theta_{ws} = \frac{V_{ws}}{V_t}$
$\theta_{bw} = \frac{V_{bw}}{V_t}$	$\theta_{fw} = \frac{V_{fw}}{V_t}$
$\theta_a = \frac{V_a}{V_t}$	$\theta_a = \frac{V_a}{V_t}$

avec $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$ et $\rho_{wc} = 1,53 \text{ g/cm}^3$.

Légende :

V : Volume
 M : Masse
 ρ : Densité
 TE : Teneur en eau
 d : diamètre de la racine
 l : longueur de la racine
 θ : fraction volumique
 wc : matériau cellulaire en bois
 ws : solution bois + eau liée
 w : eau
 bw : eau liée
 fw : eau libre
 a : air
 t : total
 tw : eau totale

Annexe B

Ce code génère un fichier d'entrée de simulation gprMax (.in) impliquant le modèle de sol hétérogène proposé.

```
1 clear all; clc; close all;
2
3 % Definition du nombre d'inclusions dans chaque couche
4 N1=200;
5 N2=200;
6 N3=100;
7
8 % Creation d'un fichier d'entree gprMax
9 filename=[ 'Heterog_model.in '];
10 fid1 = fopen(filename, 'w');
11
12 fprintf(fid1, '#title: Heterogeneous soil model using randomly distributed
    inclusions \n');
13 fprintf(fid1, '#domain: 1.00 0.60 0.40 \n');
14 fprintf(fid1, '#dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002 \n');
15 fprintf(fid1, '#time_window: 16e-9 \n\n');
16 fprintf(fid1, '#material: 4 0.001 1 0 sol \n');
17 fprintf(fid1, '#box: 0 0 0 2.00 0.80 0.60 sol \n\n');
18
19 for i=1:N1
20     % Definition de la permittivite relative des inclusions
21     emin=1;
22     emax=12;
23     e=emin+rand(1)*(emax-emin);
24     perm(i)=e;
25
26     % Definition de la conductivite electrique des inclusions
27     condmin=0.1;
28     condmax=0.2;
29     c=condmin+rand(1)*(condmax-condmin);
30     cond(i)=c;
31
32     fprintf(fid1, '#material: %f %f 1 0 niveau_1_%d \n',e,cond,i);
33
34     % Definition du rayon des inclusions
35     rmin=0;
36     rmax=0.002;
37     r=rmin+rand(1)*(rmax-rmin);
38     radius(i)=r;
39
```



```

40    % Definition de la position des inclusions (centre des spheres)
41    xmin=0.02+r;
42    xmax=1.98-r;
43    x=xmin+rand(1)*(xmax-xmin);
44
45    ymin=0.45+r;
46    ymax=0.50-r;
47    y=ymin+rand(1)*(ymax-ymin);
48
49    zmin=0.02+r;
50    zmax=0.38-r;
51    z=zmin+rand(1)*(zmax-zmin);
52
53    fprintf(fid1, '#sphere: %f %f 0 %f niveau_1_%d \n', x, y, r, i);
54 end
55
56 for i=1:N2
57    % Definition de la permittivite relative des inclusions
58    emin=1;
59    emax=10;
60    e=emin+rand(1)*(emax-emin);
61    perm(i)=e;
62
63    % Definition de la conductivite electrique des inclusions
64    condmin=0.03;
65    condmax=0.04;
66    c=condmin+rand(1)*(condmax-condmin);
67    cond(i)=c;
68
69    fprintf(fid1, '#material: %f %f 1 0 niveau_2_%d \n', e, cond, i);
70
71    % Definition du rayon des inclusions
72    rmin=0;
73    rmax=0.004;
74    r=rmin+rand(1)*(rmax-rmin);
75    radius(i)=r;
76
77    % Definition de la position des inclusions (centre des spheres)
78    xmin=0.02+r;
79    xmax=1.98-r;
80    x=xmin+rand(1)*(xmax-xmin);
81
82    ymin=0.30+r;
83    ymax=0.45-r;
84    y=ymin+rand(1)*(ymax-ymin);
85
86    zmin=0.02+r;
87    zmax=0.38-r;
88    z=zmin+rand(1)*(zmax-zmin);
89
90    fprintf(fid1, '#sphere: %f %f 0 %f niveau_2_%d \n', x, y, r, i);
91 end

```

```
92
93
94 for i=1:N3
95     % Definition de la permittivite des inclusions
96     emin=1;
97     emax=8;
98     e=emin+rand(1)*(emax-emin);
99     perm(i)=e;
100
101     % Definition de la conductivite des inclusions
102     condmin=0.001;
103     condmax=0.002;
104     c=condmin+rand(1)*(condmax-condmin);
105     cond(i)=c;
106
107     fprintf(fid1, '#material: %f %f 1 0 niveau_3_%d \n', e, cond, i);
108
109     % Definition du rayon des inclusions
110     rmin=0;
111     rmax=0.004;
112     r=rmin+rand(1)*(rmax-rmin);
113     radius(i)=r;
114
115     % Definition de la position des inclusions (centre des spheres)
116     xmin=0.02+r;
117     xmax=1.98-r;
118     x=xmin+rand(1)*(xmax-xmin);
119
120     ymin=0.02+r;
121     ymax=0.30-r;
122     y=ymin+rand(1)*(ymax-ymin);
123
124     zmin=0.02+r;
125     zmax=0.38-r;
126     z=zmin+rand(1)*(zmax-zmin);
127
128     fprintf(fid1, '#sphere: %f %f 0 %f niveau_3_%d \n', x, y, r, i);
129 end
130
131 fprintf(fid1, '\n');
132 fprintf(fid1, '#waveform: gaussiandotnorm 1 1e9 pulse \n\n');
133 fprintf(fid1, '#hertzian_dipole: z 0.04 0.50 0.2 pulse \n');
134 fprintf(fid1, '#rx: 0.10 0.50 0.2 \n');
135 fprintf(fid1, '#src_steps: 0.01 0 0 \n');
136 fprintf(fid1, '#rx_steps: 0.01 0 0 \n\n');
137 fprintf(fid1, '#material: 31.81 0.00078 1 0 racine \n');
138 fprintf(fid1, '#cylinder: 0.50 0.20 0 0.50 0.20 0.40 0.01 racine \n');
139 fprintf(fid1, '#geometry_view: 0 0 0 1.00 0.60 0.40 0.002 0.002 0.002
    Heterog_model \n');
140 fclose(fid1);
```


Liste des publications

A – Revue internationale avec comité de lecture

1. A. Aboudourib, M. Serhir, D. Lesselier, « A Processing Framework for Tree-Root Reconstruction using Ground-Penetrating Radar under Heterogeneous Soil Conditions », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Early Access*, doi :10.1109/TGRS.2020.2993719, mai 2020 (on line), pp. 1-12.

B – Conférences internationales avec comité de lecture

2. A. Aboudourib, M. Serhir, D. Lesselier, « Near-field characterization of root systems, from computational modeling and simulations to controlled laboratory experiments », Contribution invitée, *The 42nd PIERS, Photonics & Electromagnetics Research Symposium*, Xiamen, Chine, décembre 2019.
3. A. Aboudourib, M. Serhir, D. Lesselier, « 3D Reconstruction of Tree Roots under Heterogeneous Soil Conditions using Ground Penetrating Radar », in Proceeding of *The 10th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar - IWAGPR 2019* (Near Surface Geoscience 2019), EarthDoc Online Geoscience Database, doi :10.3997/2214-4609.201902596, pp. 1-5, septembre 2019, La Haye, Pays-Bas.
4. A. Aboudourib, M. Serhir, and D. Lesselier, « Impact of root diameter and water content on tree roots detection using ground penetrating radar », in Proceeding of *The 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP2019), convened session : Theoretical, Algorithmic, and Experimental Advances in GPR*, ISBN 978-88-907018-8-7, 8739825, IEEE explore, pp. 1-5, mars/avril 2019, Cracovie, Pologne.

C – Conférences avec actes à diffusion restreinte et séminaires

5. A. Aboudourib, M. Serhir, D. Lesselier, « La reconstruction tridimensionnelle des architectures racinaires par le radar à pénétration de sol », Huitième conférence plénière du GDR ONDES, pp. 1-2, octobre 2019, CentraleSupélec, Gif-sur-Yvette, France.
6. A. Aboudourib, M. Serhir, D. Lesselier, « Electromagnetic imaging with focus on natural and artificial structures in subsoils », Séminaire, *Xiamen University*, Xiamen, Chine, décembre 2019.

Liste des acronymes

APS Antenna Positionning System. [126](#)

CAN Convertisseur Analogique Numérique. [20](#)

CFL Courant–Friedrichs–Lewy. [11](#), [12](#), [96](#)

CRIM Complexe Refractive Index Model. [81](#)

DGM Discontinuous Galerkin Method. [8](#)

DSP Densité Spectrale de Puissance. [111](#), [112](#)

EM élecomagnétiques. [xvi–xviii](#), [2–9](#), [11](#), [14](#), [16–18](#), [21](#), [22](#), [25–27](#), [30](#), [56](#), [64](#), [66](#), [74](#), [76](#), [81](#), [85](#), [87](#), [88](#), [97](#), [104](#), [107](#), [126](#), [128](#), [141](#), [145–147](#)

FAR Fasle Alarm Rate. [99](#)

FDTD Finite Difference Time Domain. [2](#), [8–12](#), [14](#), [18](#), [20](#), [30](#), [89](#), [96](#), [145](#)

FEM Finite Element Method. [8](#)

FVTD Finite Volume Time-Domain. [8](#)

GPR Ground Penetrating Radar. [xvi–xix](#), [2](#), [4](#), [5](#), [7](#), [8](#), [11](#), [12](#), [14–30](#), [36](#), [37](#), [45](#), [47](#), [50](#), [52](#), [53](#), [55–57](#), [64](#), [69](#), [71](#), [74–76](#), [78](#), [81](#), [83](#), [85](#), [87](#), [89](#), [90](#), [96–100](#), [105](#), [107](#), [112](#), [113](#), [115](#), [116](#), [119](#), [120](#), [126](#), [128](#), [133–137](#), [141](#), [143](#), [145–147](#)

GPU Graphics Processing Unit. [14](#), [147](#)

HDR High Dynamic Range. [xviii](#), [20](#), [126](#), [133–137](#), [143](#), [147](#)

IAD Inverse Amplitude Decay. [98](#)

IFBW Intermediate Frequency Bandwidth. [127](#)

MCR Modèle de Composition Racinaire. [66](#)

MOM Method of Moments. [8](#)

PCA Principal Component Analysis. [147](#)

PCS Point Complètement Sec. [68](#), [69](#)

PMC Point Médian Commun. [23](#), [24](#), [104](#), [105](#)

PML Perfectly Matched Layer. [97](#), [126](#)

PRF Pulse Repetition Frequency. [136](#)

PSF Point de Saturation des Fibres. [64–66](#), [68](#), [69](#), [146](#)

RHT Randomized Hough Transform. [105](#), [107–110](#), [119](#), [120](#), [130](#), [141](#)

RMSRE Root Mean Square Relative Error. [110](#)

ROI Region of Interest. [108](#), [147](#)

SAR Synthetic Aperture Radar. [xviii](#), [96](#), [110](#), [112](#)

SER Surface Equivalente Radar. [16](#)

SFCW Stepped-Frequency Continuous Wave. [18–20](#), [30](#), [126](#), [133](#)

SNR Signal-to-Noise Ratio. [16](#), [20](#), [110–113](#), [119](#), [120](#), [128](#), [135](#), [137](#)

SVD Singular Value Decomposition. [101](#), [120](#), [130](#), [140](#), [141](#), [146](#)

TEM Transverse Electromagnetic. [vii](#), [6](#), [128](#)

TFD Transformée de Fourier Discrète. [87](#)

TFDI Transformée de Fourier Discrète Inverse. [87](#)

TFI Transformée de Fourier Inverse. [19](#), [20](#), [111](#), [112](#), [128](#)

ULB Ultra Large Bande. [27](#), [30](#), [53](#)

USDA United States Department of Agriculture. [78](#)

VNA Vector Network Analyzer. [126–129](#)

Titre: Imagerie en champ proche de systèmes racinaires par radar à pénétration de sol

Mots clés: radar à pénétration de sol, architecture racinaire, reconstruction 3-D, traitement du signal et imagerie, expérimentation en laboratoire et terrain

Résumé: La cartographie de systèmes racinaires dans des sols dispersifs et inhomogènes est mise en œuvre au moyen d'une technique non-destructive : le radar à pénétration de sol (dit GPR). Ce travail est motivé par les besoins croissants en termes de contrôle de santé et de stabilité des arbres, ainsi que l'impact négatif des racines sur les infrastructures urbaines pouvant parfois compromettre la sécurité des personnes et des biens. Un état de l'art a permis de déterminer les facteurs limitant la détection et la résolution des racines ligneuses (diamètre $> 0,5$ cm) par GPR. Puis l'accent est mis sur une nouvelle procédure de traitement pour reconstruire les architectures 3-D des racines à partir de données

GPR sans information a priori sur les sols impliqués. La viabilité de la méthode proposée est étudiée à partir de simulations numériques (via gprMax) pour des modèles de racines réalistes en environnements hétérogènes dispersifs; cela implique un nombre de configurations pour une variété de sols. Des mesures contrôlées en laboratoire sont conduites sur des prototypes de racines en utilisant un système bi-statique dans la gamme fréquentielle 300 MHz – 3,3 GHz. Ceci est étendu à des études terrain de systèmes racinaires d'arbres réels avec l'utilisation d'un GPR commercial (MALA). Les bonnes performances et la pertinence de l'approche proposée sont illustrées par de multiples exemples.

Title: Near field imaging of tree root systems using ground penetrating radar

Keywords: ground penetrating radar, tree root architecture, 3-D reconstruction, signal processing and imaging, laboratory and field experimentation

Abstract: The mapping of tree root systems within inhomogeneous dispersive subsoils is investigated by means of a non-destructive technique: Ground-Penetrating Radar (GPR). This work is motivated by the growing need for tree health and stability control, as well as the negative impact of roots on urban infrastructure, which could seriously compromise the safety of people and properties. A state of the art has allowed us to determine the limiting factors of coarse root (diameter > 0.5 cm) detection and resolution by GPR. Then, the focus is put on a novel processing procedure to reconstruct 3-D

root architectures from GPR data with no a priori information on the soils involved. Viability is studied from comprehensive numerical simulations (via gprMax) on realistic root models in 3-D heterogeneous dispersive environments; this in particular means a number of simulations involving a variety of soils. Controlled laboratory measurements are conducted on root prototypes using a bi-static GPR system operating at 300 MHz – 3.3 GHz frequency range. This is extended to field studies on real root systems with the use of a commercial GPR (MALA). The good performance and high potential of the proposed approach are illustrated accordingly.