

Avant-propos

Mohammed SERHIR¹ et Dominique LESSELIER²

¹ *SONDRA, Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, Gif-sur-Yvette, France*

² *L2S, CNRS, Université Paris-Saclay, CentraleSupélec,
Gif-sur-Yvette, France*

Le présent volume, *Radar à pénétration de sol : approches théoriques et computationnelles, traitement du signal, antennes et applications*, proposé dans le cadre de la série SCIENCES du domaine « Ondes », relève du sujet « Instrumentation, capteurs et mesures », car il couvre ces trois domaines d'intérêt. Tous ces éléments sont illustrés dans cet ouvrage, avec un accent sur la manière de répondre aux contraintes et d'étudier le fonctionnement du radar à pénétration de sol (*Ground Penetrating Radar*, GPR), à l'aide d'un grand nombre d'expériences dans des conditions correctement contrôlées. Cependant, par souci d'exhaustivité et afin de rester en phase avec la plupart des recherches sur le GPR, la modélisation électromagnétique et l'imagerie micro-onde vont bien au-delà, et elles impliquent des défis complexes, comme le montrent les titres des chapitres de cet ouvrage.

Le matériel, tel que proposé dans l'ouvrage, se compose de huit chapitres étroitement liés. Les aspects essentiels de chaque contribution sont mis en évidence dans cet avant-propos, cependant, nous devons souligner que chaque chapitre peut ne pas rendre justice à tous les aspects étudiés en profondeur par les auteurs. Avant tout, les informations sont fournies de manière pédagogique, dans le cadre des objectifs clés de la série SCIENCES.

Le chapitre 1 est intitulé « Imagerie électromagnétique des données GPR : théorie et expériences ». Son objectif est de proposer une analyse minutieuse des approches tomographiques, avec un fort accent sur les approches qualitatives et linéarisées, car celles-ci sont assez pratiques dans le domaine d'étude, en raison de leur charge de calcul

Radar à pénétration de sol,

coordonné par Mohammed SERHIR et Dominique LESSELIER. © ISTE Editions 2025.

réduite et du fait qu'elles produisent des solutions rapides mais assez solides pour l'utilisateur final. Ensuite, les algorithmes proposés sont testés sur des données expérimentales acquises dans des conditions contrôlées, et leurs avantages et inconvénients sont soigneusement illustrés. En termes de modélisation, l'approche est basée sur une formulation de Green, rendue scalaire selon l'hypothèse couramment admise d'une polarisation magnétique transverse (TM). Si l'analyse commence à partir d'un modèle en espace libre, elle passe rapidement à la situation d'intégration d'une ou plusieurs couches, comme cela est nécessaire pour les analyses GPR. La stratégie d'imagerie choisie est, comme mentionné précédemment, qualitative. Après avoir examiné la vaste littérature sur les méthodologies de ce type, y compris les récentes proposées par les auteurs basées sur l'identification du contour des cibles et non sur l'échantillonnage de tout l'espace, la discussion porte sur la méthode d'échantillonnage linéaire (*Linear Sampling Method*, LSM), la méthode d'échantillonnage par orthogonalité (*Orthogonality Sampling Method*, OSM) et une méthode plus récemment introduite appelée méthode inverse de source exploitant des données parcimonieuses (*Boundary Inverse Source and Sparsity*, B-IS). Dans cette dernière, la recherche porte sur les contours du support de la cible, où des sources équivalentes sont localisées quelle que soit l'illumination supposée. Ensuite, la parcimonie entre en jeu, car seuls quelques pixels non nuls au sein d'un domaine de recherche potentiellement vaste sont recherchés. Ce qui précède est suivi d'une analyse attentive et substantielle des différentes méthodologies, et est complété par un examen approfondi des approches linéarisées basées sur l'approximation de Born et l'approximation de Born distordue. L'approche des expériences virtuelles (*Virtual Experiments*, VE) complète les analyses précédentes, car elle permet notamment une interprétation plus générale au-delà de la LSM ici. Après une discussion approfondie des stratégies de régularisation, l'imagerie tomographique multistatique est effectuée sur des données de laboratoire contrôlées concernant des mines terrestres 3D et des canalisations – celles fournies par Georgia Tech – et elle montre que les cibles peuvent en effet être identifiées avec précision, même si les solutions proposées ont été développées dans un contexte 2D, c'est-à-dire avec des tranches superposées à la fin.

Le chapitre 2 est intitulé « Inversions non linéaires et hybrides pour l'imagerie radar à pénétration de sol ». Il se concentre sur les méthodes non linéaires et hybrides spécifiquement développées dans le cadre de l'application du GPR pour cartographier les paramètres électromagnétiques des objets enfouis (dans l'hypothèse de paramètres indépendants de la fréquence) à partir de données multifréquences et multivues. L'approche est construite dans le formalisme de Green. Une fois le problème correctement esquissé dans ce cadre, avec les opérateurs intégraux de données et d'état habituels, une méthode déterministe non linéarisée est proposée, basée sur une approche de Newton inexacte. L'algorithme est discuté en détail dans le chapitre, et argumente qu'il est possible de séparer les zones dans lesquelles un objet est détecté de celles où rien n'est détecté. Ensuite, l'attention est portée sur les techniques d'inversion hybrides, dans lesquelles une méthode qualitative de retard et de somme est insérée dans l'algorithme. En bref, la méthode qualitative fournit des informations sur la présence ou l'absence de discontinuités

par rapport au milieu de fond. Des exemples illustrent les avancées algorithmiques dans une configuration quasi monostatique, où les résultats de la méthode qualitative, de la méthode quantitative et de la méthode hybride sont comparés en détail, confirmant la meilleure qualité de cette dernière.

Le chapitre 3 est intitulé « Déploiement des capteurs dans l'imagerie GPR souterraine ». Le point de départ englobe une variété d'approches dédiées à l'imagerie de cibles enfouies (y compris à travers les murs) pour illustrer les défis rencontrés et les solutions auxquelles elles sont susceptibles de répondre. Ensuite, il est rappelé au lecteur que les solutions d'imagerie dites linéarisées conduisent à une réduction significative de la complexité, ce qui, dans la situation du GPR, avec des conditions d'exploitation très exigeantes sur le terrain, peut être très utile s'il est correctement employé, et si l'on accepte que seules la détection, la localisation et des estimations approximatives de la forme peuvent être réalisées. C'est le point central de ce chapitre, qui donne des explications détaillées de l'opérateur direct pertinent dans le formalisme de Green, dont l'inversion est ensuite discutée en détail et se termine par un opérateur de reconstruction dite régularisée contenant tout, et sujet à un schéma de migration ; son analyse théorique est examinée en profondeur et illustrée par un exemple pédagogique simple. Ensuite, le point clé est la façon de déployer les capteurs en gérant le compromis habituel d'avoir le moins de données pour alimenter l'algorithme avec un échantillonnage approprié (parmi d'autres facteurs) qui correspond aux propriétés de l'opérateur inverse (les propriétés spectrales en effet). Une analyse attentive mêlant mathématiques et analyse numérique est ensuite proposée, en considérant des échantillonnages optimaux en fréquence et en espace, pour concevoir une solution appropriée, également soigneusement comparée aux solutions de la littérature. Un grand nombre de résultats numériques suit dans diverses configurations, dans le but de représenter au mieux les données en termes de résolution, les cas d'espace libre et de demi-espace avec des capteurs éloignés ou à la surface de séparation étant spécifiquement gérés. Dans l'ensemble, une analyse mathématique détaillée est présentée, visant à l'optimisation du déploiement des capteurs, et un praticien peut ainsi, par exemple, imaginer ce qu'il peut obtenir de mieux dans une situation donnée, même si elle est idéalisée dans un souci de compréhension par linéarisation appropriée.

Le chapitre 4 est intitulé « Tomographie radar à pénétration de sol pour l'héritage culturel ». Il s'agit de fournir une évaluation non invasive des structures enfouies/cachées dans le domaine des applications du patrimoine culturel. En effet, dans les études archéologiques, les images GPR souterraines nous permettent de cartographier un site donné à l'avance afin de planifier correctement les activités d'excavation pour accéder à des connaissances précieuses sur les caractéristiques cachées des sites qui ne peuvent pas être excavés. Il existe de nombreux exemples en Italie, ainsi que dans de nombreux autres endroits, tels que les sols bien conservés des *domus* romaines, les églises et une multitude de bâtiments historiques. De plus, le GPR permet de réaliser des relevés structuraux pour obtenir des informations utiles pour évaluer l'état de conservation des biens historiques ainsi que pour caractériser les actions de restauration antérieures. Dans

ce cadre, une autre amélioration des capacités du GPR est réalisée au moyen d'approches de traitement des données tomographiques basées sur des modèles appropriés de propagation électromagnétique dans des scénarios complexes, désignées sous le nom de tomographie GPR (*GPR tomography*, GPRT) dans le domaine des micro-ondes. Comme analysé précédemment, cela devrait fournir à l'utilisateur final une multitude d'images haute résolution, plus facilement interprétables que les radargrammes standards. Le chapitre commence par passer en revue les concepts sous-jacents du GPR et des approches de tomographie par micro-ondes avec une insistance sur les procédures linéaires, et discute en détail des mises en œuvre efficaces. Cela permet aux auteurs d'obtenir une base solide pour les investigations pratiques qui suivent. Ces dernières sont illustrées par plusieurs exemples d'études GPRT réalisées par les auteurs et leurs collègues sur trois sites archéologiques célèbres. Dans le parc archéologique de Paestum en Campanie, des zones assez vastes dans le parc et à proximité de celui-ci étaient restées inexploitées par les moyens classiques. Les relevés GPRT avec des fréquences autour de 200 MHz permettent des relevés profonds et rapides, ce qui a permis d'obtenir des cartes impressionnantes des structures potentielles, toutes confirmées ultérieurement par des fouilles appropriées. Pour le palais de Knossos en Crète, la principale préoccupation était d'examiner plus en détail la possible restauration radicale (par Evans) au début du XX^e siècle de ses murs et piliers et comment elle a été déployée, avec le besoin d'une résolution nette maintenant impliquant l'utilisation de la fréquence centrale beaucoup plus élevée de 2 GHz. Le troisième cas est la tombe de Paphos du roi de Chypre, pour lequel les restaurations antérieures devaient également être vérifiées, en particulier pour les fissures et autres fractures dans les colonnes, avec la possibilité de causer des dommages supplémentaires. Cela signifiait qu'une fois de plus la GPRT était effectuée dans la plage de 2 GHz comme dans le cas précédent. Pour conclure, la nouvelle génération, ou du moins l'ajout de systèmes GPR montés sur des véhicules aériens sans pilote, est envisagée. Son potentiel dans le domaine des études archéologiques est débattu. En particulier comment la permittivité élevée du sous-sol peut-elle affecter l'analyse si les antennes sont utilisées dans la gamme du GHz ? *A contrario* cette solution permet une cartographie riche de la surface, comme le montre un prototype testé dans les parcs archéologiques de Paestum et Velia (et aussi en Campanie).

Le chapitre 5 est intitulé « Équation radar à ondes complètes pour la propagation des ondes dans les milieux multicouches et ses applications ». Son objectif principal est de présenter et d'expliquer les formulations en champ lointain et en champ proche pour la modélisation en ondes complètes (*full-wave*) des données radar. Des exemples sont donnés pour illustrer les principales caractéristiques et démontrer le potentiel ou les utilisations avérées sur le terrain. La formulation en champ lointain suppose que l'antenne est suffisamment éloignée et que le champ sur l'ouverture de l'antenne est homogène. En revanche, la formulation en champ proche est un modèle plus sophistiqué qui s'applique lorsque la distribution du champ diffusé dépend de la distance et des propriétés du milieu. Le modèle en champ proche généralise l'approche en champ lointain en utilisant le principe de superposition, en décomposant la distribution du champ en une somme de

distributions de base à l'aide d'un ensemble de sources/récepteurs ponctuels. Les deux formulations sont développées dans le cadre d'un milieu diélectrique stratifié plan, et les fonctions de Green spectrale et spatiale sont explicitées pour les deux. Dans les modèles en champ lointain et en champ proche, les fonctions caractéristiques de l'antenne ne dépendent pas de la distance du milieu ou de ses propriétés. En fait, le modèle en champ lointain est un cas particulier du modèle en champ proche, plus précisément le modèle généralisé avec $n = 1$, où n représente le nombre de points sources et récepteurs. La récupération des fonctions caractéristiques de l'antenne devient plus complexe lorsque n augmente. Lorsque $n = 1$, la récupération est analytique, mais pour $n > 1$, elle est numérique. Une estimation inverse analytique est toujours recherchée. La télédétection est effectuée en minimisant correctement une fonction objective. La première application illustrée est la cartographie de l'humidité du sol à l'aide de drones et de quads, avec de nombreux exemples d'intérêt donnés. La deuxième application est la reconnaissance des gestes dans une scène donnée ou à travers différents matériaux, avec là aussi des exemples fournis. Les auteurs envisagent également d'utiliser cette technologie pour la reconnaissance des schémas respiratoires, qui en est encore à ses débuts en ce qui concerne l'ingénierie des antennes et le traitement. Les auteurs concluent que la méthodologie en champ lointain est bien développée, mais qu'une analyse plus poussée de l'approche en champ proche est nécessaire, notamment en ce qui concerne les problèmes de calibration. Ils proposent de nombreuses références pour une lecture complémentaire sur ces aspects.

Le chapitre 6 est intitulé « Évaluation des chaussées flexibles par GPR : 20 ans de R&D en France ». Il est clairement axé sur une application spécifique, mais cette application est essentielle si nous voulons maintenir les routes en bon état à un prix raisonnable, et le GPR apparaît comme l'outil parfait pour ce défi (même si un intérêt est également porté à d'autres outils, comme la gammadensimétrie et une multitude de dispositifs mécaniques, comme souligné également par les auteurs). La contribution propose d'abord une analyse claire et complète de l'état de l'art des inspections des chaussées, avec un accent approprié mais non privilégié sur le développement de solutions en France, où un effort important a été entrepris ces deux dernières décennies et est actuellement à un niveau élevé. La première partie est consacrée aux systèmes et à l'acquisition des données GPR tels qu'ils existent, en mettant en avant la situation particulière du diagnostic rapide. Ensuite, le lecteur trouvera le traitement et l'interprétation, proposant une multitude de résultats pour illustrer les points principaux. Ensuite, des compléments sur d'autres tests non destructifs sont fournis, et une analyse appropriée de leurs avantages et inconvénients est effectuée. Puis, peut-être au cœur de ce chapitre, une belle quantité de nouvelles approches est proposée pour permettre de meilleures évaluations plutôt que par le biais d'un traitement conventionnel, qui peut échouer à moins qu'une série stricte d'hypothèses sur la chaussée ne soit remplie. Ces approches, discutées en détail, relèvent du nom d'algorithme haute résolution pour l'estimation des temps de retard. Cependant,

l'inversion en onde complète (*full-wave*) semble également avoir un fort potentiel, comme le soulignent les auteurs et de nombreux chercheurs, avec les promesses de l'intelligence artificielle qui sont spécifiquement mentionnées. Le radar à synthèse d'ouverture tomographique est également montré comme valant la peine d'être davantage exploré, car il fournit des cartes rapides et très précises. Ceci est l'une des conclusions du chapitre, parmi de nombreuses autres.

Le chapitre 7 est intitulé « GPR pour la reconstruction des racines d'arbres sous des conditions de sol hétérogènes ». En effet, l'idée principale est que nous ne pouvons pas analyser – sauf exception – les systèmes racinaires des arbres de la manière nécessaire pour le génie civil afin d'optimiser l'environnement naturel et l'estimation de la biomasse avec des moyens destructifs, à moins qu'une expérience unique (par exemple, l'excavation) ne soit tentée pour comparaison. Le GPR semble donc être une bonne façon d'acquérir davantage de connaissances sur ces systèmes avec le moins de tracas possible. La contribution, après une discussion élaborée sur les systèmes racinaires et leur environnement, développe un cadre de traitement qui vaut pour des conditions de sol complexes et une variété d'architectures de racines, et montre comment il s'applique en utilisant des antennes spécifiquement adaptées pour cartographier un système racinaire, avec à la fois des expériences en laboratoire et sur le terrain pour illustrer les avancées et mettre en évidence les défis ouverts. Ce chapitre ne met pas l'accent sur des solveurs sophistiqués, c'est-à-dire FD-TD, ce qui est le cheval de bataille choisi pour obtenir les données simulées qui aident les auteurs, et qui utilise des outils de traitement plutôt classiques pour éliminer le bruit, estimer la permittivité du sol, et en fin de compte produire rapidement des images bien définies. Cette approche pragmatique et approfondie devrait intéresser de nombreux utilisateurs finaux dans la communauté GPR. Le rôle clé des racines d'arbres dans la nature et leur évolution climatique devraient aussi plaire à de nombreux lecteurs, d'autant plus que c'est Léonard de Vinci qui a été l'un des tout premiers à avoir émis l'hypothèse de l'architecture des racines d'arbres de manière mathématique.

Le chapitre 8, intitulé « Radars sondeurs et à pénétration de sol pour l'exploration du système solaire : focus sur Mars », clôt excellemment le volume, car il nous emmène dans les environnements fascinants des planètes et des astéroïdes, et examine le développement et l'utilisation de radars d'auscultation et de GPR en tant qu'éléments essentiels de la charge utile instrumentale dans presque toutes les missions planétaires. Pour permettre au lecteur de saisir les avancées actuelles, une vue d'ensemble des radars passés, actuels et futurs développés pour l'exploration planétaire est proposée, illustrée par des exemples soigneusement choisis montrant l'étendue des efforts déployés jusqu'à présent. Ensuite, étant donné qu'il existe évidemment de nombreuses contraintes qui impactent la conception et les performances techniques d'un radar, l'interprétation des données est fortement prise en compte. Après une analyse appropriée de ces problèmes, l'auteur se concentre sur la caractérisation du sous-sol martien, qui a déjà été envisagée par des radars en orbite et au sol. Les détails des modes de fonctionnement, des études

menées à partir des données collectées et des leçons concernant le diagnostic des structures souterraines sont évalués successivement. Il est particulièrement observé que, parmi d'autres conclusions, une compréhension qualitative de la configuration du sous-sol est assez facilement obtenue à partir des images GPR traitées, mais des analyses quantitatives sont nécessaires pour soutenir l'identification tentée des matériaux du sous-sol et des compréhensions approfondies de l'environnement. Cependant, la grande variété de sondeurs opérant dans différentes gammes de fréquences fournit de nombreux résultats complémentaires et offre des contributions significatives à des questions scientifiques difficiles, tandis que la connaissance des structures géologiques enfouies est en effet essentielle pour comprendre les mécanismes de formation et l'évolution des sites étudiés. Ensuite, le développement de deux radars pour sonder le sous-sol martien est discuté : l'étude électromagnétique du sous-sol (*Electromagnetic Investigation of the Subsurface*, EISS) et l'observation des dépôts de glace d'eau en sous-surface sur Mars (*Water Ice Subsurface Deposit Observation on Mars*, WISDOM), conçus dans le cadre de la mission ExoMars. À ce jour, le premier a été « descopé », l'accent est donc mis sur le second, programmé pour plus tard. Cependant, le travail mené autour d'eux est utile dans tous les cas comme souligné. Dans le contexte de l'exploration martienne, le radar WISDOM GPR à pas fréquentiel de 500 MHz-3 GHz a été développé pour répondre aux besoins de caractérisation du sous-sol de Mars, dans le cadre de la suite d'instruments de la charge utile du rover ExoMars, cela se déroulant encore une fois avec des contraintes sévères liées au contexte spatial (masse, volume et consommation très limités). Grâce aux excellents résultats obtenus par les radars d'exploration (sur Mars, la Lune et Titan) et les GPR (sur Mars et la Lune), la dernière section conclut sur une série de radars qui sont actuellement en développement pour les futures missions qui caractériseront le sous-sol d'autres corps de notre système solaire.

Pour conclure cet avant-propos, nous présentons une série de questions qui se posent encore aujourd'hui et auxquelles le présent volume certainement ne répond pas totalement. Cependant, à notre avis, en tant que coordinateurs, cet ouvrage englobe de nombreux problèmes difficiles déjà soulevés, et c'est ce qui rend l'analyse intéressante à la fois sur le plan éducatif et sur le plan de la recherche, pour les théoriciens, les numériques, ainsi que pour les ingénieurs et les praticiens. Nous pouvons mentionner : 1) les capteurs multiples et la modélisation véritablement tridimensionnelle, la cohérence des formulations scalaire et dyadique des champs électromagnétiques de Green (celles-ci peuvent être à la base des méthodes de résolution, l'analyse mathématique pouvant alors aller assez en profondeur et fournir une meilleure compréhension de l'imagerie elle-même, puisque, par exemple, FD-TD est très puissant, mais peut sembler moins adapté à l'inversion des signaux eux-mêmes) et/ou des quantités associées (les paramètres S bien connus comme les plus pertinents) ; 2) les environnements opérationnels, puisqu'ils combinent des cas dispersifs, hétérogènes et en effet fortement incertains ; 3) les acquisitions éparses optimisées afin d'écourter le temps précieux du manipulateur sur le terrain ; 4) le traitement des signaux presque en temps réel et la production d'images en

vue de la prise de décision par l'utilisateur final ; 5) le fait que tout signal soit produit/collecté par des structures d'antenne réelles qui réclament également des optimisations soigneuses dans le contexte des applications envisagées (un ensemble de ces applications est discuté dans les différents chapitres proposés, mais elles ne sont certainement pas uniques), et toutes ces questions ouvertes sont reconnues comme non exhaustives. De plus, l'apprentissage profond dans le contexte actuel pourrait faire l'objet d'un volume entier, et est suggéré par au moins plusieurs contributeurs, puisque le GPR est un cas clair d'incertitude épistémique et aléatoire, comme cela est discuté dans la communauté du *deep learning* sous diverses formes. En ce qui concerne la nécessité de mélanger intelligemment des données expérimentales potentiellement éparses et certainement erronées avec, en principe, des données parfaitement simulées mais complétées de manière appropriée par des erreurs astucieusement construites (pas réduites à des bruits gaussiens blancs additifs comme trop souvent en vérité), tout en construisant les réseaux nécessaires, cela reste, pour le moins, un problème exigeant.

Enfin, en tant que coordinateurs du présent volume, nous tenons à dire qu'il n'aurait pas été possible sans les contributions sophistiquées et opportunes des auteurs ni sans l'élan donné par le Dr Frédérique de Fornel, qui gère intelligemment le domaine des ondes de la série SCIENCES. Il est vrai qu'un certain nombre d'autres contributeurs dans le domaine du GPR auraient pu fournir leurs recherches dans cet ouvrage, mais nous ne prétendons certainement pas être exhaustifs, principalement dans l'espoir que ce volume se concentre non seulement sur les bons outils dans le domaine exigeant du GPR au plus haut niveau de recherche, mais qu'il attire également les étudiants et les jeunes scientifiques vers ce domaine, car il annonce de nombreux nouveaux développements en harmonie avec les demandes concrètes et de plus en plus pressantes de la société dans un large éventail de domaines.