Projet dans le cadre du Graduate Program CODS
2026-2027

Analyse d'une liaison radio près du sol dans le cadre d'un milieu stratifié ou à gradient d'indice

Proposé par :
Shermila Mostarshedi (shermila.mostarshedi@univ-eiffel.fr)
Benoit Poussot (benoit.poussot@univ-eiffel.fr)

Contexte :

La conception et la planification de systèmes de communication sans-fil nécessitent une caractérisation précise de la propagation des ondes dans leur environnement. Une demande de modélisation concerne les systèmes sans-fil fonctionnant près ou dans un milieu à pertes qui deviennent aujourd'hui une partie intégrante de nombreuses infrastructures. Différents exemples d'application peuvent être mentionnés, tels que les réseaux de capteurs près du sol pour la surveillance de l'environnement ou les réseaux de capteurs souterrains pour l'agriculture de précision ou la surveillance sous-marine (Figure 1). La présence du milieu à pertes crée un certain nombre de nouveaux problèmes dans la modélisation de la propagation des ondes qui doivent être compris, modélisés, simulés et validés.

Outre l'aspect communication, les systèmes de localisation et de détection doivent également prendre en compte la complexité des milieux sondés dans le traitement des données afin d'obtenir avec précision l'information recherchée. Les radars à pénétration de sol (GPR : Ground Penetrating Radar) constituent un bon exemple dans ce domaine. Ils exploitent la propagation des ondes électromagnétiques dans des milieux stratifiés afin de détecter des inclusions ou des hétérogénéités. De nombreuses applications peuvent être citées, notamment en archéologie ou dans le cadre du contrôle non destructif des structures en génie civil (routes, pistes d'aéroport, ponts, etc.) (Figure 2).

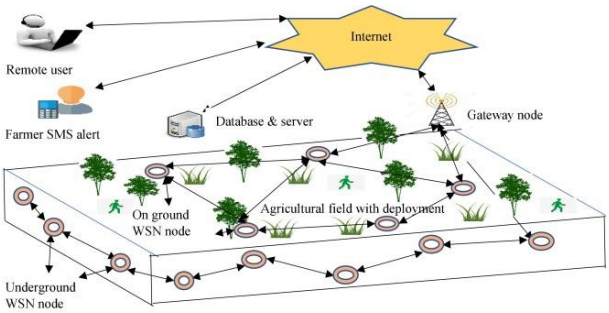

Figure 1. Réseaux de capteurs près du sol et enfouis utilisés dans l'agriculture
https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106928

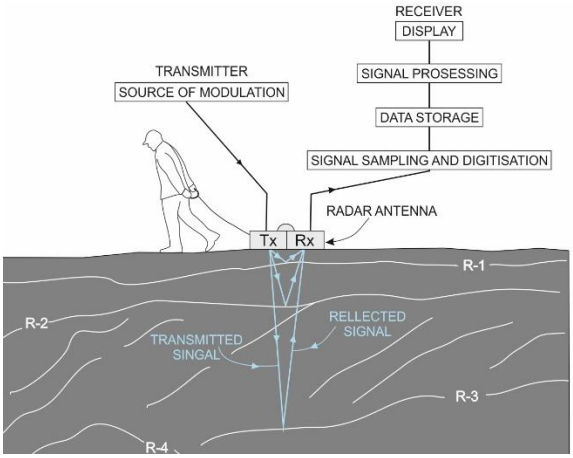

Figure 2. Radar à pénétration de sol en génie civile
https://mineclosure.gtk.fi/ground-penetrating-radar/

Dans le cadre de la thèse de doctorat de Hocine Belaid (2021-2025), des avancées théoriques corroborées par des résultats expérimentaux concernant une liaison radio près du sol ont été réalisées. Dans ces études, le sol est considéré comme un milieu semi-infini, homogène à pertes.

Dans le cadre de ce projet, nous souhaitons explorer l'impact d'un sol stratifié ou d'un milieu à gradient d'indice sur la liaison radio près de l'interface. Il s'agit d'évaluer la transmission radio entre deux antennes situées proches du sol en fonction des caractéristiques géométriques et électriques de l'interface et des paramètres de la liaison radio (hauteurs d'antennes, fréquence de fonctionnement, polarisation de l'onde).

Objectifs :

Les travaux menés au laboratoire ESYCOM ont permis d'obtenir des avancées théoriques concernant une liaison radio proche du sol et/ou enfouie. Les résultats théoriques du modèle proposé ont été publiés dans deux revues internationales [1], [2]. De premiers résultats expérimentaux, corroborant le modèle théorique, ont également fait l'objet d'une publication dans une conférence internationale [3]. Ces travaux antérieurs s'inscrivent dans le volet « systèmes de communication » et portent sur la modélisation du « problème direct » d'une liaison radio à proximité d'une interface.

Dans le cadre de ce projet, nous ouvrons un nouveau volet scientifique consacré à la « localisation et à la détection », avec une modélisation du « problème inverse » à proximité d'une interface complexe. Cette interface peut représenter, selon les cas considérés, un sol stratifié ou présentant un gradient d'indice.

L'objectif est d'obtenir des informations sur la qualité et les propriétés du sous-sol à partir de l'analyse de l'onde électromagnétique mesurée au-dessus du sol. Dans cette perspective, nous nous appuierons sur plusieurs ressources issues de l'état de l'art dans ce domaine. D'une part, nous exploiterons les travaux consacrés au GPR et à la caractérisation des sols stratifiés [4], [5]. D'autre part, nous nous intéresserons aux travaux portant sur les phénomènes électromagnétiques dans les milieux multicouches, notamment sur la distinction entre onde de surface et onde latérale [6], [7].

Les étapes de travail seront orientées sur deux axes : modélisation et mesure.

- Modélisations électromagnétiques
    - Problème directe : compréhension des phénomènes électromagnétiques avec une interface simple homogène.
    - Problème directe : extension de la modélisation à une interface multicouche.
    - Problème inverse : détection d'un « défaut » dans un milieu à pertes en tenant compte de l'interface simple puis de l'interface multicouche.
- Expérimentations
    - Mesures de la liaison près du sol pour les différentes interfaces et comparaisons avec les modèles

Références :

[1] H. Belaid, S. Mostarshedi, B. Poussot, J.-M. Laheurte, "On the Validity of the Asymptotic Near-Ground Propagation Model of Hertzian Dipole for Finite-Length Dipole Antennas," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, no. 12, vol. 21, 2022.

[2] H. Belaid, S. Mostarshedi, B. Poussot, J.-M. Laheurte, "Accurate Estimation of the Lateral Wave's Contribution to the Radiated Fields of a Vertical Electric Dipole Embedded in a Lossy Half-Space," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 72, no. 11, 2024.

[3] H. Belaid, S. Mostarshedi, B. Poussot, J.-M. Laheurte, "A Preliminary Experimental Demonstration of the Norton Surface Wave in a Radio Link," *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications* (ICEAA), 2024 Sep 2-6.

[4] L. Zou, Lilong, L.Yi, M. Sato, "On the use of lateral wave for the interlayer debonding detecting in an asphalt airport pavement using a multistatic GPR system, " *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 58, no. 6, 2020.

[5] S. L. Panda, S. Maiti, U. K. Sahoo, "Subsurface propagation velocity estimation methods in ground-penetrating radar: A review," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 10, no. 4 2022.

[6] A. P. Annan, "Radio Interferometry Depth Sounding: Part I-Theoretical Discussion," *Geophysics*, vol. 38, no. 3, 1973.

[7] L. M. Brekhovskikh, *Waves in Layered Media*, Academic Press, 2012.