

Localisation des fuites dans les conduites de distribution d'eau par réflexion des rayons infrarouges et des ondes radar.

LEMAACHI SALAHIDINE¹

¹Élève ingénieur, école CentraleSupélec; lemaachi.salah@gmail.com

Compiled August 7, 2022

Actuellement, la détection des fuites d'eau a devenu l'un des plus importants sujets de recherche dans le monde vu les quantités d'eau potable énormes perdus dans les fuites de canalisations. La France par exemple, perd chaque année, 20% des volumes produits ce qui correspond à 1.3 Milliards de m³ d'eau traités par l'usine. Plusieurs solutions ont apparu aux pays de l'europe, l'installation des capteurs d'humidité de sol et des capteur ultrasons au long des conduites reste l'une des solutions les plus utilisées, cependant, cette dernière est compliquée à implémenter ainsi que coûteuse puisqu'elle exige une maintenance continue des différents capteurs dans l'installation. En exploitant l'influence de l'humidité du sol sur la réflectance des ondes électromagnétiques, on a étudié la possibilité de localiser les fuites dans les conduites enterrées par un drone qui mesure en même temps la réflectance des rayons infrarouges pour détecter l'humidité du sol superficiel dans le cas où la conduite est à l'extérieur, et des ondes radio dans le cas où la conduite est profondément enterrée en parcourant le trajet de la canalisation d'eau.

<http://dx.doi.org/10.1364/ao.XX.XXXXXX>

1. INTRODUCTION

Le contenu d'eau dans le sol (CES) est un aspect critique dans l'agriculture, l'hydrologie, la micrométéorologie, l'ingénierie civile, les sciences de climats ... Pour le moment, il n'y a pas une méthode conventionnelle pour mesurer le CES, la méthode classique et la plus exacte est la méthode gravimétrique ou thermogravimétrique qui consiste à chauffer un échantillon du sol dans un four de labo, noter le poids avant et après, et déduire le CES. Toutefois, cette méthode est destructive et le CES varie rapidement dans l'espace et le temps. Pour cette raison, il est nécessaire de trouver une méthode non destructive et qui peut délivrer une analyse complète d'une surface donnée. La télédétection est une méthode non invasive qui peut nous offrir les données avec des différentes résolutions spatiales et surtout avec des prix raisonnables. Reposant sur le principe de radar, la réflectométrie peut détecter une l'anomalie représentée par

une discontinuité d'impédance qui reflète une partie du signal envoyé par la sonde. Plusieurs études ont été faites pour comprendre l'influence de la matière organique et le type du sol sur sa réflectance, la bande des longueurs d'ondes entre 1100nm et 1900nm était trouvé comme la bande optimale pour observer le maximum de l'absorbance dans le sol.

2. RÉFLECTOMÉTRIE INFRAROUGE : MODÈLE PHYSIQUE

Dans cette étude on va adopter le modèle multicouche de Ångström (1925) qui considère le sol comme une couche de sol sec couverte par une fine couche d'eau (figure 1), amélioré par Bach et Mauser (1994) qu'ils ont introduit la loi de Beer-Lambert-Bouguer pour prendre en compte l'absorption de la lumière dans la couche d'eau. En se basant sur le transfert radiatif du modèle multicouche, on peut écrire la réflectance totale du sol sous la forme suivante :

$$R_{tot} = r_{12} + t_{12}T_e^2R_s t_{21} + t_{12}T_e^4R_s^2r_{21}t_{21} + \dots$$

D'où :

$$R_{tot} = r_{12} + \frac{t_{12}T_e^2R_s t_{21}}{1 - T_e^2R_s r_{21}}$$

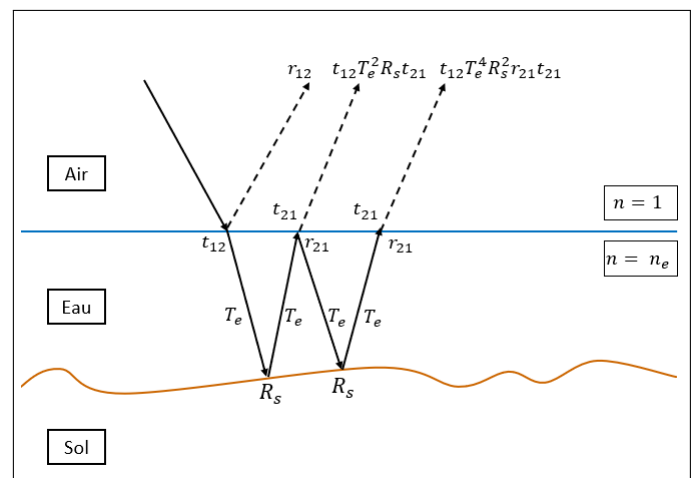


Fig. 1. Modèle physique du sol

Avec :

- r_{12} la réflectance directe au niveau de la surface Air-Eau
- t_{12} la transmissivité lorsque le rayon passe de la surface Air-Eau
- T_e la transmittance de l'eau
- R_s la réflectance au niveau de la surface Eau-Sol

A. Lien avec le CES

Comme étant la transmittance dans la couche d'eau, T_e , dépend de l'absorbance de l'eau pure. T_e peut être calculée par la loi de Beer-Lambert-Bouguer:

$$T_e = e^{\epsilon(\lambda)L}$$

Avec ϵ le coefficient d'absorption de l'eau pure qui dépend de la longueur d'onde du rayon lumineux et L l'épaisseur de la couche d'eau qui est bien corrélée avec le CES. En minimisant l'erreur quadratique entre la réflectance mesurée expérimentalement et la réflectance simulée par la formule trouvée on peut déterminer une valeur de l'épaisseur effective de la couche d'eau.

$$Q_{Lost}(L) = \sqrt{\frac{\sum_{\lambda} (R_{mes}(\lambda) - R_{tot}(\lambda, L))^2}{num_{\lambda}}}$$

Avec :

- R_{mes} la réflectance mesurée pour une certaine longueur d'onde
- R_{tot} la réflectance simulée par la formule trouvée
- num_{λ} le nombre des longueurs d'onde étudiées

Après on peut effectuer des mesures de réflectance pour des échantillons de sol avec des CES connus, déduire la longueur L d'après la réflectance, et enfin construire un modèle de régression qui lie $CES = f(L)$. On quantifie le CES de la manière suivante:

$$CES = \frac{M_1 - M_2}{M_1} * 100\%$$

Avec :

- M_1 la masse de l'échantillon du sol
- M_2 la masse de l'échantillon séché

Jusqu'à maintenant on a mis en évidence le lien physique entre la réflectance et le CES ainsi que la possibilité de construire un modèle statistique pour prédire le CES à partir de la réflectance, on peut affiner encore le modèle pour prendre en compte la matière organique contenu dans le sol qui peut changer la transmittance de la couche d'eau d'un échantillon à l'autre en ajoutant un terme de concentration dans la loi de Beer-Lambert-Bouguer.

$$T_e = e^{\epsilon(\lambda)cL}$$

Avec c la concentration de la matière organique dans le sol

Cependant, pour notre application (détection des fuites d'eau), on n'a pas besoin d'une mesure exacte du CES mais juste une approximation afin de détecter l'anomalie du CES qui sera dans le point de fuite.

B. Evaluation du modèle

Afin d'évaluer le modèle physique adopté, on a réalisé une expérience en utilisant notre propre prototype pour un capteur de réflectance. Il s'agit d'un conteneur d'échantillon de sol éclairé par quatre LED infrarouge 1200 nm (figure 2), une photodiode pour capter les rayons réfléchis et un tube qui passe par l'échantillon pour augmenter l'humidité progressivement avec des quantités d'eau bien quantifiées sans perturber la surface de l'échantillon pour éviter tout impact de la rugosité de la surface sur la mesure de la réflectance. Le signal capté par le capteur infrarouge est après filtré par passe bas pour éliminer le bruit et puis traité pour calculer la réflectance.

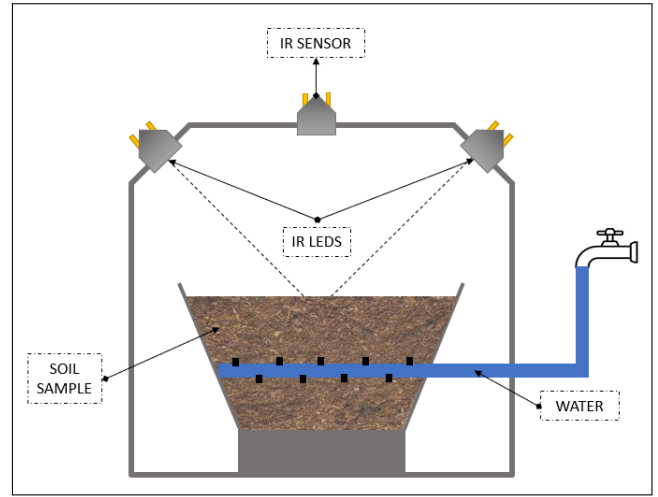


Fig. 2. Expérience de validation du modèle .

C. Resultats

Les résultats de l'expérience (figure 3) valident le modèle physique adopté, et confirment la corrélation supposée entre la réflectance mesurée et le CES. On remarque une certaine saturation de la réflectance pour les niveaux hauts du CES ou le sol est proche de la saturation.

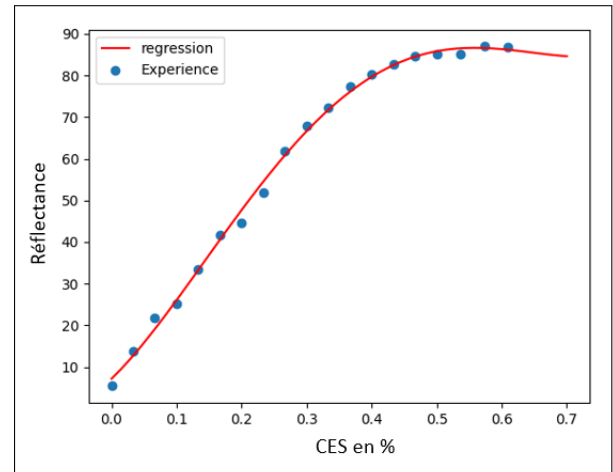


Fig. 3. Resultats de l'expérience.

Reste maintenant à construire un modèle statistique qui lie le CES avec la réflectance, je l'ai réalisé en implémentant une

régression polynomiale d'ordre 4 (figure 3) par la methode du moindre carré. Resultat :

$$Relectance(CES_v) = CES_v \cdot Beta$$

avec :

$$Beta = [6.61, 133.39, 647.34, -1760.66, 1132.52]^T$$

$$CES_v = [1, CES, CES^2, CES^3, CES^4]$$

3. REFLEXION DES ONDES RADIO

Inspiré par le principe de fonctionnement des georadars, on a pensé à intégrer cette solution dans notre système de drone afin de détecter meme les fuites qui ne sont pas sur la surface du sol. Le géoradar, initialement de nature impulsioneille, est fondé sur l'excitation du sous-sol, à partir d'une antenne d'émission, par un train d'impulsions de durée courte (1 à 50 ns) afin de détecter, à l'aide d'une antenne de réception, les échos successifs associés aux contrastes de permittivités ou de conductivités rencontrés par les ondes électromagnétiques au cours de leur propagation. Ces contrastes témoignent de la présence de cibles enfouies ou de stratifications du sous-sol. L'utilisation du géoradar fréquentiel est bien plus récente en raison des contraintes instrumentales qui lui sont associées, et il fait l'objet d'un nombre important de travaux de recherche actuels. Réaliser une experience réel pour tester la possibilité de détecter une fuite d'eau reste compliqué vu l'existence des objets enterrés qui vont gêner les resultats, pour cette raison, on a conçu de réaliser une simulation électromagnétique plutôt qui va reproduire le comportement des ondes et prouver ou rejeter l'hypothèse posée en utilisant la methode des difference finies.

La methode des difference finies est une technique à utiliser pour simuler la propagation des ondes électromagnétiques qui s'appuie sur la discrétisation de l'espace-temps ainsi que les opérateurs différentiels par les formules de Taylor, et apres résoudre les equations numériquement. Les ondes électromagnétiques se propagent dans l'espace en suivant les quatre equations de Maxwell qu'on peut rassembler sous la forme suivante :

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \nabla * H$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla * D$$

$$D(w) = \epsilon_0 \epsilon_r^*(w) E(w)$$

La formulation au-dessus n'est pas une formulation répandue dans les bouquins physiques mais tellement utilises dans la physique computationnelle puisqu'elle simplifie les calculs ; en effet sous cette forme les deux premières equations restent inchangées en fonction des caractéristiques du milieu et c'est la dernière equation qui porte toute l'information sur ce dernier. Peut etre, vous avez observez que la dernière equation est dans le domaine de fréquence au contraire des autres, cela est fait exprès pour faciliter la discrétisation en passant au domaine fréquentiel : Prenant par exemple un diélectrique de permittivité relative ϵ_r et de conductivité σ donc :

$$\epsilon_r^*(w) = \epsilon_r + \frac{\sigma}{jw\epsilon_0}$$

D'où :

$$D(w) = \epsilon_r E(w) + \frac{\sigma}{jw\epsilon_0} E(w)$$

En revenant au domaine temporel le premier terme n'est qu'une simple multiplication et le deuxième correspond à une intégration sur le temps, donc :

$$D(t) = \epsilon_r E(t) + \frac{\sigma}{\epsilon_0} \int_0^t E(t) dt$$

En discrétisant, on trouve :

$$D^n = \epsilon_r E^n + \frac{\sigma \Delta t}{\epsilon_0} \sum_{i=0}^{i=n} E^n$$

Avec l'indice n correspond a l'instant $n\Delta t$.

De meme, on discrétise les deux premières equations dans le temps et l'espace par des approximations centrales des opérateurs différentiels et on personnalise les facteurs ϵ_r, σ selon notre modélisation de l'espace. (les deux facteurs seront des tableaux d'une ou deux ou trois dimensions selon la dimensionnalité du probleme qui décrivent leurs valeurs en chaque point de la grille).

Prenant l'exemple d'un probleme bidimensionnel où une impulsion gaussienne issue d'une source ponctuelle se propage dans un plan où il y a un diélectrique, on a codé la simulation par python (figure 4) en suivant la technique des differences finies. Les resultats de la simulation (on a pris juste le champ électrique) simulent parfaitement le cas réel et intuitif de la réflexion d'une partie de l'onde électromagnétique.

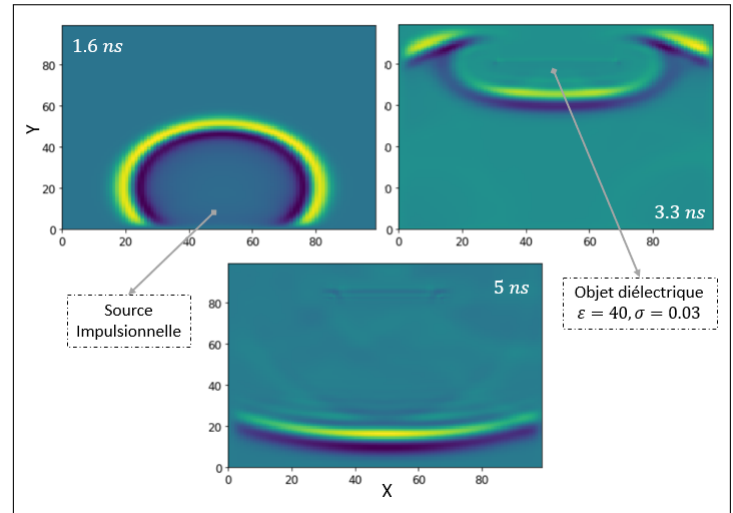


Fig. 4. Resultat de la premiere simulation.

A. modèle de l'espace

Afin de bien simuler la situation réelle d'une fuite, il faut modéliser l'espace correctement. Pour cette raison on a choisi le modèle suivant (figure 5) qui illustre la fuite comme un escalier des couches de sol saturé en eau, avec un gradient de permittivité et de conductivité électrique. L'ensemble des valeurs des constantes sont pris des études antérieures sur les georadars.

Reste maintenant à réaliser une simulation qui peut démontrer une carte du champs électrique ressenti par l'antenne réceptrice fixée sur le drone. Pour cela il faut faire des scans multiples pour chaque portion du sol au long de la conduite, enregistrer le champs réfléchis à chaque fois en fonction du temps pendant 9ns et apres le représenter dans un radargramme en fonction de

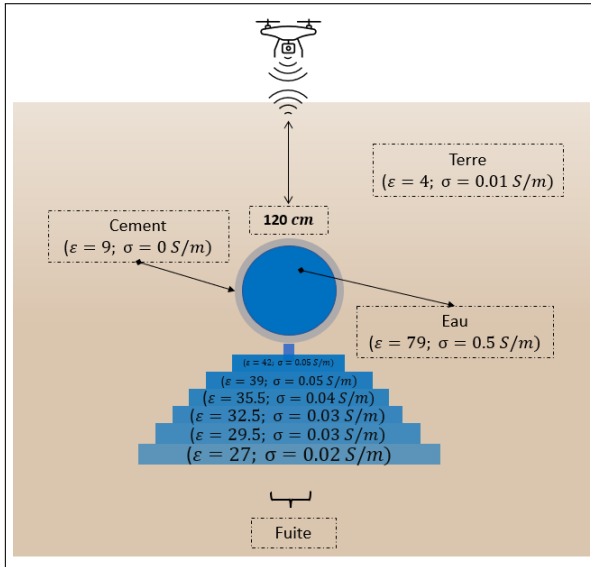


Fig. 5. Modelisation de l'espace.

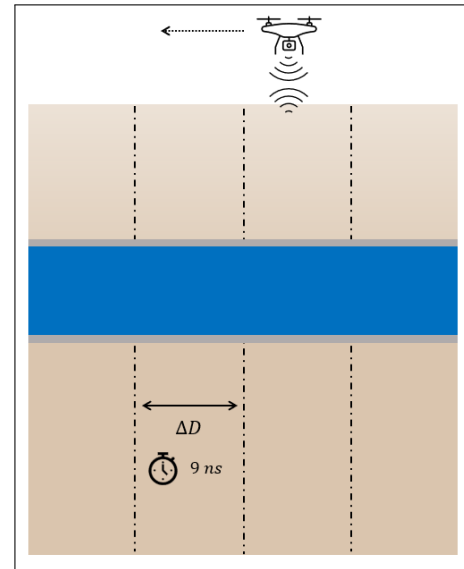


Fig. 6. Protocole d'inspection.

la position et du temps. Le principe du protocole d'inspection est illustré dans la figure 6.

Les deux figures 7 des radargrammes sont construites sur le principe des multiples scans expliqué dans le paragraphe précédent, l'axe des abscisses représente le temps d'attente et initialisé à l'instant de la première réponse ressentie par l'antenne réceptrice (chaque unité de temps est équivalente à $\Delta t = 11.2 ps$) et l'axe des ordonnées représente les portions scannées du plan (chaque unité de l'espace est équivalente à $\Delta x = 0.01 m$).

B. Résultats des simulations.

On a fait deux simulations des scans faits par le drone figures 7. Le premier est fait pour une conduite saine sans fuite et le deuxième pour une conduite avec une fuite, on peut remarquer pour les deux l'existence de la trace de la première onde réfléchi sur la conduite. Cependant, dans le deuxième, on peut distinguer quelques traces de deux hyperboles qui résultent de la fuite d'eau. D'où la possibilité de détecter une fuite en analysant les scans par des ondes radar si le drone se déplace au long de la conduite mais un peu décalée pour bien détecter les hyperboles de la fuite, en revanche si la conduite se déplace exactement sur la conduite, la figure 7 montre qu'il n'y a pas des traces bien claires au centre puisque la conduite réfléchit la plupart des ondes radar, ce qui est un avantage dans la situation réelle.

En effectuant la transformée de fourrier du signal reçu par le drone (figure 8) (on a éliminé la première impulsion réfléchi par la conduite) et puis en comparant cette transformée dans les deux situations : sans et avec fuite, on peut clairement différencier les deux grâce au spectre des fréquences ajoutées au cas où il y a une fuite. Donc pour reconnaître la fuite il suffit de mesurer l'amplitude des pics dans la transformée de fourrier et voir s'ils augmentent soudainement par rapport à leurs amplitudes précédentes. Une autre solution qui sera plus exacte, on peut aussi utiliser des outils statistiques de détection des anomalies et des motifs répétés dans les séries chronologiques pour reconnaître les traces de la fuite.

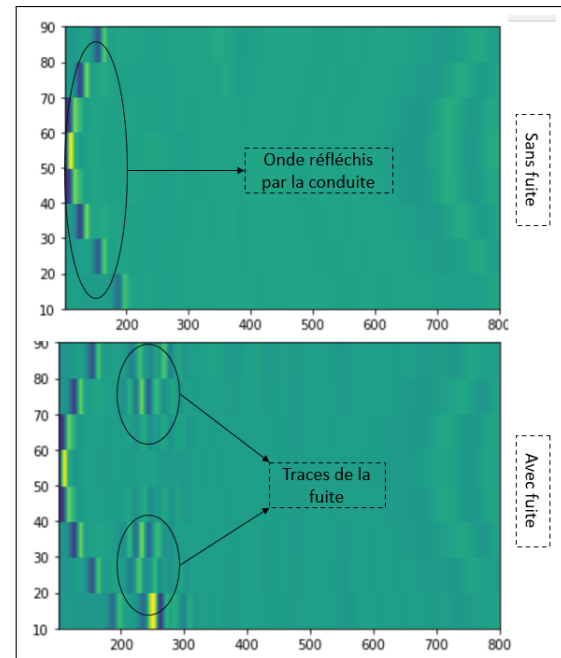


Fig. 7. Résultats de la deuxième simulation.

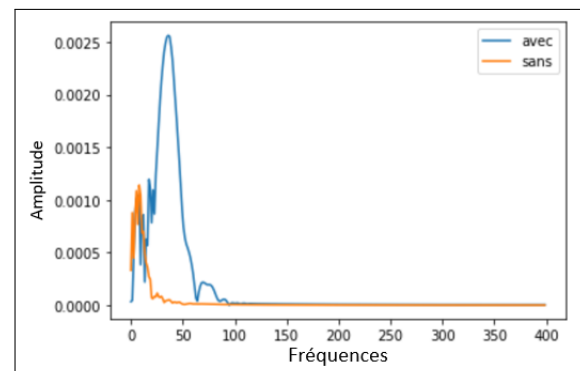


Fig. 8. Transformé de fourrier du signal reçu.

4. CONCLUSION

La théorie prouve la possibilité de détecter les fuites d'eau dans les conduites, reste maintenant à fabriquer un prototype et le tester dans la situation réelle qui peut révéler des défis non pris en considération dans la théorie mais qui restent surmontables. Un tel projet va surement être bénéfique, surtout dans cette période de sécheresse vécue au Maroc, pour notre office marocain de l'eau potable en termes d'amélioration du rendement de production mais aussi pour diminuer les dépenses dues aux fuites d'eau ; à part les millions de mètres cubes gaspillés, afin de réparer une fuite à la méthode classique il faut envoyer un agent pour inspecter toute la conduite et parfois même dans des zones inaccessibles ce qui rajoute des frais de déplacement et d'équipement. En revanche, la solution du drone est à la fois rapide et non coûteuse (il n'y a pas des parties complexes à usiner, les drones sont maintenant disponibles pour des prix adéquats, le radar et les émetteurs-récepteurs infrarouges sont aussi simple à concevoir).