



HAL
open science

Paramétrisation d'un modèle hydrogéologique à l'aide de mesures GPR

Moua Rohianuu, N. Lesparre, Jean-François Girard, Benjamin Belfort,
Francois Lehmann

► To cite this version:

Moua Rohianuu, N. Lesparre, Jean-François Girard, Benjamin Belfort, Francois Lehmann. Paramétrisation d'un modèle hydrogéologique à l'aide de mesures GPR. 12e Colloque GEOFCAN, Mar 2021, Grenoble, France. hal-03426909

HAL Id: hal-03426909

<https://hal.science/hal-03426909v1>

Submitted on 12 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PARAMETRISATION DE MODELES HYDROGEOLOGIQUES A L'AIDE DE MESURES GPR

MOUA R.¹, LESPARRE N.¹, GIRARD J.F.¹, BELFORT B.¹, LEHMANN F.¹

¹ Institut Terre et Environnement de Strasbourg, Université de Strasbourg/EOST/ENGEES, CNRS UMR 7063, 5 rue Descartes, Strasbourg F-67084, France

rmoua@unistra.fr, lesparre@unistra.fr, jf.girard@unistra.fr, belfort@unistra.fr, lehmann@unistra.fr

RESUME

Cette étude présente les méthodes utilisées pour modéliser des expériences d'infiltration d'eau dans un sol, suivies par radar de sol et le schéma d'inversion construit en couplant les modèles hydrogéologiques et géophysiques. Les résultats préliminaires des tests d'inversion, réalisés pour ajuster des données synthétiques simulées, montrent qu'on peut estimer la conductivité hydraulique à saturation.

Mots clés : Radar de sol, Infiltration de sol, Paramètres de modèles hydrogéologiques

PARAMETERIZATION OF HYDROGEOLOGICAL MODELS USING GPR SURVEYS

ABSTRACT

This study shows the methods we develop to model and monitor water infiltration in soil experiments with surface GPR. We propose an inversion algorithm, coupling both hydrogeological and geophysical models. Preliminary inversion tests conducted in order to adjust synthetic data, show that we can estimate the saturated hydraulic conductivity parameter.

Key words: Ground Penetrating Radar, Soil infiltration, Hydrogeological models parameters

INTRODUCTION

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet CAPROZOVA -CAractérisation des PROcessus de la ZONE VAdose-. Nous observons et modélisons des expériences de variations du contenu en eau de la zone vadose par l'association de mesures in-situ et géophysiques.

Plusieurs types d'expériences sont réalisées (imbibition-drainage, infiltration-désaturation, suivi de variations naturelles) et suivies par différents types de mesures (in-situ, radar de sol, résonance magnétique protonique, polarisation spontanée).

Nous nous intéressons ici aux expériences d'infiltration suivies par radar de sol (Ground Penetrating Radar, GPR). L'objectif est de contraindre les paramètres hydrodynamiques d'un modèle d'infiltration « classique ». Pour cela, nous développons une méthodologie d'ajustement des paramètres hydrodynamiques pour qu'ils permettent de reproduire les données géophysiques observées.

Nous présentons ici les méthodes de modélisation des expériences d'infiltration d'eau et leur suivi par GPR, ainsi que le schéma itératif, couplant chaque modèle hydrogéologique au modèle géophysique correspondant, pour lequel nous présentons les premiers résultats.

MATERIEL ET METHODES

Modélisation Hydrogéologique

Des expériences d'infiltration ont été menées sur un site contrôlé, la plateforme expérimentale du SCERES -Site Contrôlé Expérimental de Recherche pour la réhabilitation des Eaux et Sols- (ITES) et en milieu naturel, sur le bassin versant du Strengbach (ohge.unistra.fr, cf. **Fig. 1**). Pour réaliser et contrôler l'infiltration, nous remplissons d'eau un bac ouvert à sa base, enfoncé dans les premiers centimètres du sol, et mesurons les variations de la lame d'eau à l'aide d'une sonde CTD (cf. **Fig. 2**).

Pour modéliser ces expériences, nous utilisons le code WAMOS-1D (Belfort et al. 2018). Ce code utilise l'équation de Richards en 1D combinée au modèle de Mualem – van Genuchten pour la description des relations constitutives reliant pression – teneur en eau et conductivité. C'est dans ces relations qu'interviennent les paramètres hydrodynamiques K_{sat} , θ_r , θ_s , α , n . Pour résoudre l'équation de Richards, il faut imposer la hauteur d'eau mesurée dans le bac d'infiltration comme condition à la limite supérieure. La profondeur de nappe, est imposée comme condition à la limite inférieure du domaine. Pour les conditions initiales en pression, le milieu poreux est considéré à l'état d'équilibre hydrostatique. Après résolution du modèle hydrogéologique et pour un jeu de paramètres

hydrodynamiques donné (cf. Fig. 4 : p_{mod}), nous obtenons en sortie les profils de teneurs en eau verticaux au cours du temps $\theta(z, t)$.



Fig. 1 - Infiltration de sol réalisée sur le bassin versant du Strengbach, juillet 2020

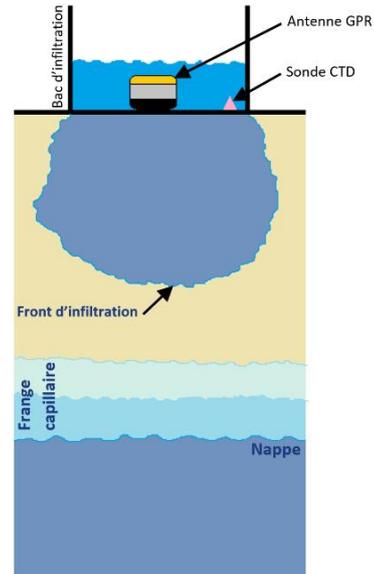


Fig. 2 - Illustration d'une expérience d'infiltration

Modélisation Géophysique

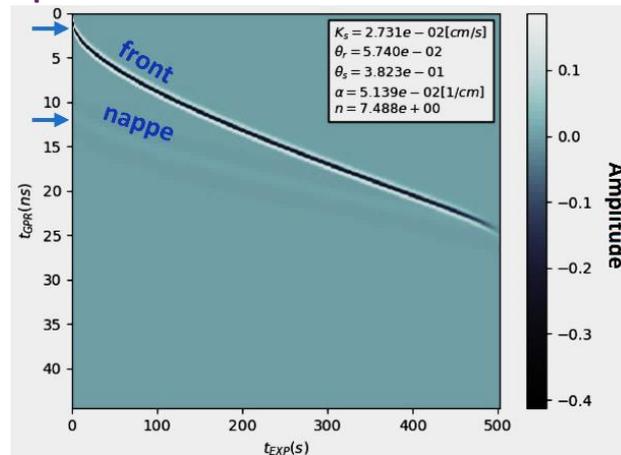


Fig. 3 – Radargramme modélisé. Sont pointés par des flèches bleues les temps d'arrivées des réflexions sur le front d'infiltration et sur la nappe, définie à 1m de profondeur

La vitesse de propagation des ondes radar dans le sol s'exprime par

$$V \approx 0.3 / \sqrt{\epsilon} \text{ m.ns}^{-1} \quad (1)$$

avec ϵ la permittivité diélectrique effective du milieu. Tout contraste de permittivité entraîne alors une réflexion de ces ondes.

Pour convertir les profils de teneur en eau $\theta(z, t)$ extraits des modèles hydrogéologiques, en profils de permittivité diélectrique $\epsilon(z, t)$, nous utilisons la relation de CRIM

$$\sqrt{\epsilon} = (1-\phi)\sqrt{\epsilon_m} + \theta\sqrt{\epsilon_f} + (\phi-\theta)\sqrt{\epsilon_a} \quad (2)$$

où les propriétés ϵ_m , ϵ_f et ϵ_a représentent respectivement les permittivités diélectriques de la matrice solide, du fluide et de l'air, et ϕ la porosité. Chaque milieu hydrogéologique est ainsi défini par ces propriétés.

Deux méthodes sont utilisées pour calculer le signal GPR enregistré à chaque instant t de l'infiltration :

- Par convolution de la réflectivité 1D (interpolée dans le domaine temporel) avec une impulsion électromagnétique proche de celle dans nos expériences de suivi GPR (Léger et al. 2014)

- Par le calcul des réflexions-transmissions en domaine fréquentiel sur un modèle de couches (cours Marthelot J.M.) à partir de notre modèle 1D de permittivité $\epsilon(z, t)$. Cette deuxième méthode est privilégiée pour des configurations de sol avec de forts gradients de vitesses.

Les modèles géophysiques nous permettent de calculer les temps de trajet d'une onde réfléchie (appelé proxy X) sur le front d'infiltration et la stratification du milieu pour un GPR immobile à la surface du sol (positionné dans le bac) au cours de l'infiltration, qu'on peut visualiser sous forme de radargramme (cf. Fig. 3).

Schéma itératif d'inversion couplée

Pour ajuster les paramètres des modèles hydrogéologiques afin de reproduire des données de référence, nous suivons la méthodologie suivante (cf. Fig. 4) :

- Détermination d'un proxy X_{ref} sur les données GPR de référence (= mesure expérimentale)
- Modélisation de données GPR à partir de $p_{mod} = (K_{sat}, \theta_r, \theta_s, \alpha, n)$
- Extraction du proxy modélisé X_{mod} (= temps de trajet sur une réflexion choisie)
- Ajustement des paramètres hydrodynamiques p_{mod} par minimisation d'une fonction objectif représentant l'écart entre la donnée modélisée à la donnée de référence :

$$RMSE_{mod} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X_{ref}(t_i, p_{ref}) - X_{mod}(t_i, p_{mod})]^2} \quad (3)$$

i : indice du temps de l'expérience, mod: indice du modèle

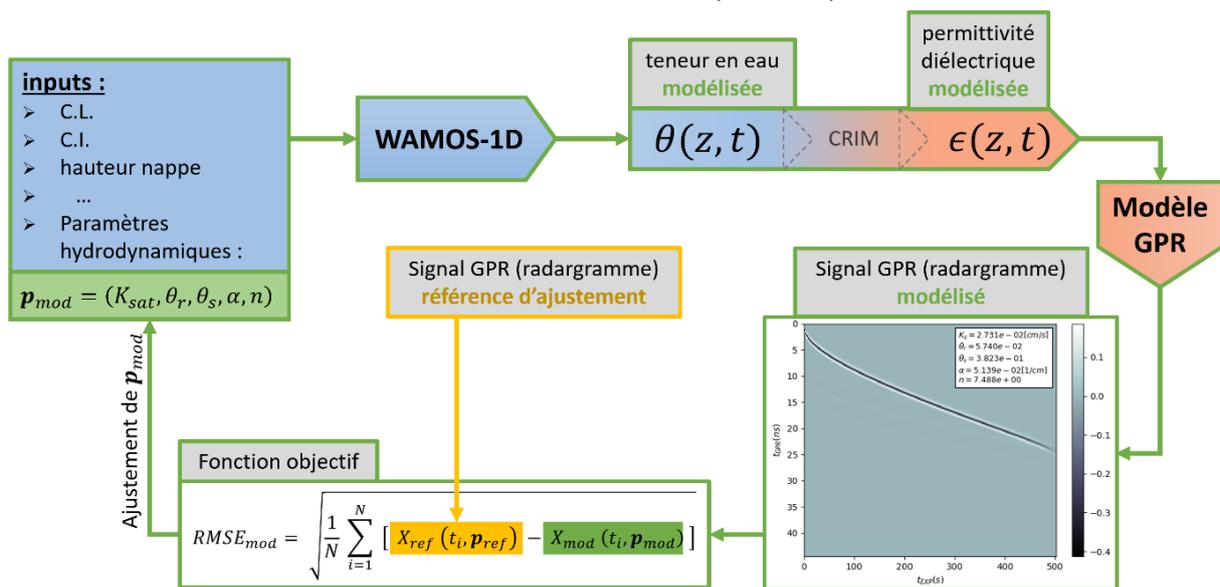


Fig. 4 – Boucle méthodologique du schéma itératif d'inversion couplée

RESULTATS PRELIMINAIRES

Nous réalisons des analyses de sensibilité à partir de notre schéma d'inversion sans chercher d'optimisation mais en explorant l'espace des paramètres hydrodynamiques, pour évaluer sa capacité à estimer les différents paramètres hydrodynamiques (de Mualem - van Genuchten) du modèle hydrogéologique. Dans un premier temps, nous choisissons comme données synthétiques un de nos modèles calculés.

Une première analyse a été réalisée avec une fonction objectif calculée sur le proxy $X=T_f$, le temps d'arrivée de la réflexion sur le front d'infiltration. Elle a permis de mettre en évidence la forte sensibilité de T_f à la conductivité hydraulique à saturation K_{sat} du milieu (cf. Fig. 5) et une sensibilité à α qui diminue lorsque la profondeur de nappe augmente (cf. Fig. 6).

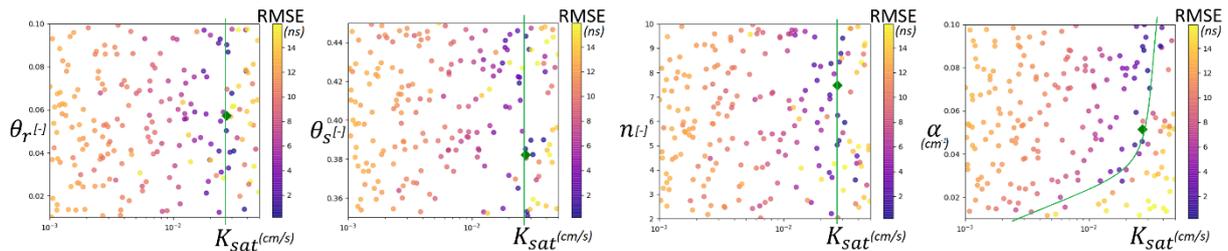


Fig. 5 - Analyses de sensibilité par calcul du RMSE sur T_f , à partir d'un modèle synthétique (losange vert). Les modèles correspondent à un domaine homogène de 2m de hauteur et une nappe à 1m de profondeur (les tendances -courbes vertes- sont identiques pour des profondeurs de nappe variant entre 0.2m et 10m)

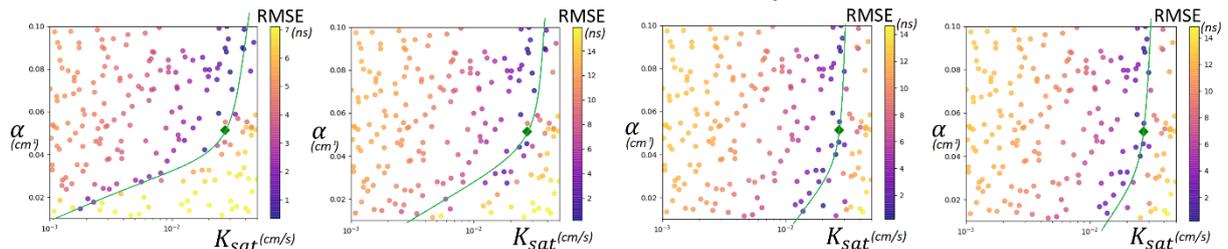


Fig. 6 - Analyses de sensibilité par calcul du RMSE sur T_f , à partir d'un modèle synthétique (losange vert). Les modèles sont en tout point identiques à ceux de la figure 1, sauf pour la profondeur de nappe qui prend les valeurs, de gauche à droite sur la figure : 0.5m, 1m, 2.5m, 5m

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les premiers résultats de nos analyses de sensibilité ont montré que notre schéma d'inversion est capable d'estimer la conductivité hydraulique K_{sat} du milieu lorsqu'on calcule l'écart du temps d'arrivée de la réflexion sur le front d'infiltration, par rapport à un modèle synthétique.

Nous réalisons actuellement de nouvelles analyses de sensibilité en modifiant le proxy. Il s'agit de déterminer s'il existe, pour une expérience d'infiltration, des proxys sensibles envers les autres paramètres hydrodynamiques θ_r , θ_s , α et n .

Un premier proxy en cours d'étude est le temps d'arrivée de la réflexion sur un objet ponctuel localisé sous la nappe. La propagation de l'onde GPR est ainsi perturbée par le profil de rétention, ce qui n'est pas le cas pour T_f où l'onde parcourt toujours un milieu saturé. L'étape suivante sera de tester l'application de notre schéma d'inversion à des données réelles et d'estimer l'erreur sur les paramètres hydrodynamiques obtenus afin d'évaluer la pertinence de la méthodologie développée.

REMERCIEMENTS

Nous remercions la Région Grand-Est et l'Université de Strasbourg pour le co-financement de la thèse de Moua R. et le laboratoire ITES pour le financement du projet CAPROZOVA.

Nous remercions enfin les participants au projet CAPROZOVA, Razakarisoa O., Friedmann P., Cotel S., Hernandez A., Bano M. et Zhang M. (tous affiliés au laboratoire ITES), pour le développement et la réalisation des expériences et de leur suivi.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BELFORT B., TOLONI I., ACKERER P., COTEL S., VIVILLE D., & LEHMANN F., 2018 - Vadose zone modeling in a small forested catchment: Impact of water pressure head sampling frequency on 1D-Model calibration. *Geosciences*, 8(2), 72.

LEGER E., SAINTENOY A., COQUET Y., 2014 – Hydrodynamic parameters of a sandy soil determined by ground-penetrating radar inside a single ring infiltrometer. *Water Resour. Res.*, 50, 5459–5474.

MARTELOT J.M. - Ondes sismiques (consulté à l'adresse : JMM@EOST : [ondes.sismiques \(free.fr\)](http://ondes.sismiques.free.fr))