

SPATIALISATION DE VARIABLES PHYSIQUES DANS LES SOLS PAR METHODES GEOPHYSIQUE, GEOTECHNIQUE ET GEOSTATISTIQUE : APPROCHE NUMERIQUE

RABOULI S¹., DUBOIS V¹., HENINE H²., CLEMENT R.¹

¹IRSTEA, UR REVERSAAL, 5 rue de la Doua - BP 32108, 69616, Villeurbanne Cedex, France (remi.clement@irstea.fr)

² IRSTEAL, UR HYCAR, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes-CS 10030, 92761 Antony Cedex, France

RÉSUMÉ :

On considère souvent le sol comme un réacteur biologique pour le traitement des eaux usées domestiques, ou comme un exutoire pour le rejet des eaux traitées mais aussi comme un milieu à irriguer. Dans ces cas, la perméabilité du sol est un paramètre clé pour disposer de la capacité d'infiltration nécessaire, et ainsi atteindre le traitement attendu. A ce jour, il n'existe pas de technique satisfaisante permettant d'évaluer la perméabilité d'un sol hétérogène (et sa variabilité) à l'échelle d'une parcelle de sol. Le développement d'une méthodologie permettant de spatialiser les propriétés du sol est essentiel. Ici, nous démontrons l'intérêt de l'utilisation d'une méthode géostatistique, la BME « Bayesian Maximum Entropy », pour la réalisation d'une cartographie en 2D- 3D de la capacité d'infiltration des sols hétérogènes. Cet outil ouvre des perspectives d'optimisation du dimensionnement des ouvrages réalisant l'infiltration d'eaux usées traitées.

Mots clés : Capacité d'infiltration, Couplage, Géostatistiques, Reuse, Spatialisation

ABSTRACT:

SPATIALIZATION OF PHYSICAL VARIABLES IN SOILS BY GEOPHYSICAL, GEOTECHNICAL AND GEOSTATISTIC METHODS: DIGITAL APPROACH

Soil is often considered as a biological reactor for the treatment of domestic wastewater, or as an outlet for the discharge of treated water but also as an environment to irrigate. In both cases, the permeability of the soil is a key parameter to have the necessary infiltration capacity, and to achieve the expected treatment. To date, there is no satisfactory technique for evaluating the permeability of a heterogeneous soil (and its variability) at the scale of a parcel of soil. The development of a methodology for spatialising the properties of the soil is essential. We demonstrate here the interest of the use of a geostatistical method, the BME "Bayesian Maximum Entropy", for the realization of a cartography in 2D- 3D infiltration capacity of heterogeneous

soils. This tool opens up prospects for optimizing the sizing of structures that infiltrate treated wastewater.

Key words: Infiltration capacity, Coupling, Geostatistics, Reuse, Spatialisation

.1 INTRODUCTION

En France, quel que soit le type de filière, les effluents traités des stations d'épuration des eaux usées domestiques sont rejetés dans le milieu récepteur, et bien souvent dans le lit d'une rivière. Dans certains cas, le rejet est infiltré dans le sol, faute de rivière à proximité ou pour limiter l'impact du rejet des eaux usées traitées. Il est donc préférable de favoriser l'infiltration de l'effluent dans le sol pour limiter l'impact vers la rivière voire pour « affiner » la qualité de l'eau usée traitée. En effet, le sol est souvent mis en avant comme un bon épurateur des eaux usées domestiques (*Petit-jean et al., 2015*) (*Rolland, 2000*). Or, le traitement des eaux usées traitées par le sol est conditionné par sa capacité à se laisser traverser par l'effluent. Dans ce contexte la connaissance de la conductivité hydraulique à saturation reste l'un des paramètres clé qui décrit la capacité d'infiltration dans le sol. Cette capacité d'infiltration va nous permettre de définir, le potentiel d'un sol à « affiner » les eaux usées traitées. La mesure de la conductivité hydraulique à saturation est décrite dans la littérature. De plus, dans les années 80, de nombreux travaux, ont été réalisés pour la caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols homogènes notamment avec le développement de différents systèmes de mesure. Cependant, en contexte hétérogène, l'utilisation des infiltromètres classiques ne permet pas d'avoir une information représentative de l'ensemble du site d'étude. La problématique centrale, réside alors dans la dispersion de la conductivité hydraulique à saturation dans les sols hétérogènes. Localement, les tests d'infiltration permettent d'obtenir des mesures fiables. Cependant, au regard de leur faible couverture dans l'espace, ces tests ne fournissent qu'une information partielle du site, qui demandent à être complétés (*Brunet et al. 2011*). Or, multiplier les mesures peut s'avérer être une démarche trop invasive, fastidieuse et coûteuse. Certes, l'information spatiale de l'hétérogénéité du sol est bien présente dans les mesures géophysiques. Mais, ces mesures sont sous-explorées à cause de l'incertitude des mesures et de l'influence des différents paramètres du sol. En effet, les méthodes géophysiques fournissent un premier niveau de spatialisation à condition de ne considérer qu'une seule relation en tout point de l'espace. Or, comme la variabilité de la relation pétro-physique en contexte hétérogène est complètement négligée, ces relations ne peuvent donc pas être appliquées à des sols hétérogènes de manière fiable. Ainsi, sur le terrain, l'utilisation de ces lois pour transformer les signaux géophysiques (résistivité électrique, vitesses des ondes) en conductivité hydraulique à saturation par exemple, induirait de grandes erreurs et ne permettrait pas d'obtenir une cartographie 2D ou 3D acceptable de la conductivité hydraulique.

Pour la connaissance des variations des propriétés physiques du sol, l'intégration rigoureuse des informations issues des mesures électriques nécessite donc l'utilisation d'autres méthodes de spatialisation. Ces méthodes tiennent compte à la fois des mesures ponctuelles et celles géophysiques. En 2002, certains auteurs (*Bogaert, 2002*), avaient montré que la fusion des données bayésiennes répondait à cet objectif, notamment la méthode BME : « Bayesian Maximum Entropy ». En effet, la BME permet d'intégrer, le plus rigoureusement possible, les informations provenant de sources de données différentes (hydrologique et géophysique), ainsi que des incertitudes et des informations à priori différentes sur chaque jeu de données pour obtenir une meilleure prédiction spatiale de la variable d'intérêt. Dans d'autres types d'applications, cette méthode a donné des résultats concluants (*Christakos et al., 2001*). Son avantage (par rapport aux méthodes de Krigeage ou d'interpolation plus classiques) est que le cadre bayésien peut tirer profit des mesures incertaines mais spatialisées tout en fournissant une estimation de l'incertitude de prédiction qui peut être introduite dans les outils de modélisation ou d'aide à la décision. De manière générale, la BME s'inclut dans les questions scientifiques majeures de la représentativité et du changement d'échelle. Le présent article propose d'investiguer numériquement l'intérêt de la méthode.

.2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

La démarche générale s'organise en deux parties. Dans un premier temps, nous allons construire un jeu de données synthétiques de conductivité hydraulique à saturation à partir d'une spatialisation contrôlée (K_s). Celle-ci est basée uniquement sur une distribution pseudo-aléatoire suivant un concept statistique. Pour cela, nous avons généré numériquement l'équivalent d'une surface rugueuse aléatoire, avec différents facteurs d'auto-corrélation, afin de produire sur une parcelle de 25m X 25m, des hétérogénéités multiples.

Au travers de la bibliographie, nous avons recherché un ensemble de données reliant à la fois les conductivités hydrauliques, la teneur en eau et la résistivité, en compilant les données. Ainsi, nous avons pu construire une relation, de type pétro-physique, résistivité teneur en eau et conductivité hydraulique. Cette relation nous a permis de transformer les conductivités hydrauliques en résistivités électriques vraies du modèle. Ensuite, nous avons simulé des mesures de trainées de résistivités électriques pour obtenir des cartes surfaciques de résistivités électriques apparentes qui ont été bruitées. Puis, nous avons extrait des points représentant les mesures réelles à partir des données de conductivité hydrauliques. Dans un deuxième temps, l'ensemble des mesures a été introduit dans le code de BME adapté aux besoins géophysiques. Pour montrer l'intérêt de la méthode BME dans la spatialisation, nous avons choisi de réaliser une analyse paramétrique. Pour cela, nous avons fait varier la taille des hétérogénéités, puis la teneur en eau, et enfin l'amplitude du bruit.

Les résultats BME ont été comparés au krigeage classique, et à la transformation simple des résistivités électriques au travers d'une relation empirique. La comparaison a été réalisée en utilisant des cartographies des données vraies exprimées sous forme de probabilité de densité de l'erreur.

Pour la partie résultat, on simule l'exposant positif de la conductivité hydraulique. Le code couleur montre que le sol contient trois grands types de sols, à savoir : les valeurs de k_s 10^{-7} , 10^{-4} , 10^{-3} correspondent respectivement aux : argile, limon et sable. Dans la suite, le terme de «conductivité hydraulique» sera employé pour désigner l'exposant positif de la conductivité hydraulique.

.3 RESULTATS

La figure ci-dessous indique les résultats de la spatialisation par les méthodes géophysiques dont la BME, pour une teneur en eau homogène de 0.25 et un bruit gaussien de 16%, sur des données de résistivité apparente. Vingt points d'échantillonnages ponctuels ont été simulés.

Les résultats montrent que :

- le krigeage seul (c), est naturellement celui qui décrit le moins bien la répartition des données hétérogènes.
- L'utilisation des données géophysiques (d) avec une loi reliant la résistivité et la conductivité hydraulique à saturation via la teneur en eau, montre que les grands ensembles sont retrouvés mais que les hétérogénéités sont fortement lissées.
- En revanche, la méthode BME (e) est celle qui permet de générer des hétérogénéités dans la donnée, et de moins lisser les mesures. Les sous-ensembles d'hétérogénéité sont ainsi retrouvés, d'autres apparaissent à certain endroit en générant des artéfacts.

Cependant, la fonction de probabilité de densité de l'erreur (f) montre que la BME améliore les résultats.

Nous verrons que dans l'analyse paramétrique, l'influence du nombre de point et leur position est primordiale. En contexte bruité, la BME permet d'obtenir des cartes plus robustes que la simple relation de type « pétro-physique ».

Nous remarquons aussi que l'ensemble des résultats est conditionné par la bonne connaissance de l'incertitude de nos mesures. D'autre part, la prise en compte de la teneur en eau sera primordiale pour la suite des estimations.

Plus tard, des règles pour l'application future de la méthode seront proposées.

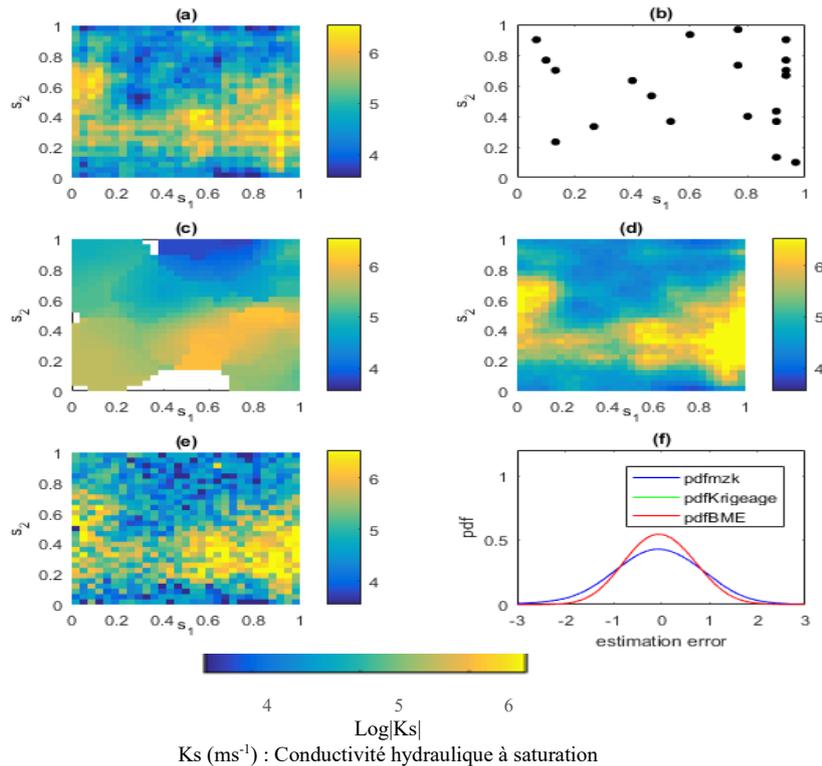


Figure : Résultats de la spatialisation : (a) Données de conductivité hydraulique simulée, (b) Mesure ponctuelle, (c) krigeage, (d) Relation pétro-physique simple, (e) BME, (f) Densité de probabilité de l'erreur entre les teneurs en eau obtenu par : transformation pétro-physique (bleu) krigeage (vert) et BME (rouge)

.4 CONCLUSION

La BME est une méthode géostatistique qui permet d'améliorer la spatialisation de la conductivité hydraulique à saturation. En milieu hétérogène, elle offre des perspectives intéressantes de modélisation par rapport au simple Krigeage.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- PETITJEAN A., FORQUET, N., CHUBERT, J.-M., COQUERY, M., BOUYER, M., AND BOUTIN, C., 2015– Land characterisation for soil-based constructed wetlands. Adapting investigation methods to design objectives. *Water Practice and Technology*, v. 10, no. 4, p. 660–668.
- ROLLAND, L., 2009 - Analyses comparatives de systèmes d'infiltration-percolation. *Colmatage et outils de diagnostics*. Université de Montpellier 2.

BRUNET, P., CLEMENT, R., AND BOUVIER, C., 2011,-Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT).A case study in the Cevennes area, France. *Journal of Hydrology*, v. 380, no. 1–2, p. 146–153.

BOGAERT, P., 2002.- Spatial prediction of categorical variables. The Bayesian maximum entropy approach.*Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*16(6),p. 425-448.

CHRISTAKOS, G., SERRE, M.L., KOVITZ J., 2001.-BME representation of particulate matter distributions in the state of California.*Jour. Geophysical Research-D*, 106(D9), p. 9717-9732.