

Infiltration et potentiel de recharge des nappes dans les noues d'infiltration : Analyse par approche hydro-géophysique

Infiltration and Groundwater Recharge Potential in Infiltration Swales: Analysis Using a Hydro-Geophysical Approach

Khalil Lhamidi, Jamal El Khattabi

Univ. Lille, IMT Nord Europe, JUNIA, Univ. Artois, ULR 4515 - LGCgE, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement

RÉSUMÉ

Le changement climatique modifie profondément le cycle hydrologique et accroît les risques d'inondation dans les zones urbanisées. La gestion durable et intégrée des eaux pluviales (GDIEP) vise à atténuer ces impacts en favorisant l'infiltration. Les noues notamment, permettent non seulement de réduire les débits de pointe et les risques d'inondation, mais également de contribuer à la recharge des nappes. La caractérisation des flux d'infiltration et du potentiel de recharge nécessite le suivi des dynamiques hydriques dans la zone non saturée, une tâche rendue complexe notamment par l'hétérogénéité hydro-géologique.

La Tomographie de Résistivité Électrique (ERT) constitue une méthode non destructive permettant de suivre ces variations, en fournissant des informations spatialisées et temporellement résolues sur l'humidité du sol, les états de saturation et les propriétés hydrauliques. En capturant l'hétérogénéité de la zone vadose, l'ERT facilite la compréhension des processus d'infiltration et soutient l'estimation in situ de la teneur en eau et de la perméabilité.

Dans cette étude, nous avons développé une approche hydro-géophysique couplée intégrant l'ERT et les simulations HYDRUS-2D, afin d'estimer les variations spatio-temporelles de la teneur en eau du sol dans des conditions de terrain. Le modèle a été validé à partir de mesures in situ, avec un coefficient de corrélation $R^2 > 0.8$ pour la teneur en eau volumique. Deux scénarios, une surface engazonnée et un axe de noues, ont été analysés afin d'évaluer ces écoulements. Les résultats permettent de quantifier les variations d'eau dans l'horizon limoneux et le potentiel de recharge de la nappe sénio-turonienne. Les résultats ont également permis de mettre en lumière l'impact de certains faciès d'altération sur les dynamiques d'écoulement.

ABSTRACT

Climate change significantly affects the hydrological cycle, increasing flood risks in urbanized areas. Nature-based stormwater management approaches, such as Low Impact Development (LID), aim to mitigate these impacts by promoting infiltration, notably using swales. Swales not only reduce peak flows and flood risks but also contribute to aquifer recharge. Characterizing infiltration flows and the recharge potential of aquifers requires monitoring soil water dynamics in the unsaturated zone, a process complicated by hydrogeological heterogeneity.

Electrical Resistivity Tomography (ERT) provides a non-invasive method to monitor these variations, offering spatially and temporally resolved insights into soil moisture, saturation, and hydraulic properties. By capturing the heterogeneity of the vadose zone, ERT facilitates the understanding of infiltration dynamics and supports the estimation of water content and conductivity in situ.

In this study, we developed a coupled hydro-geophysical approach integrating ERT and HYDRUS-2D simulations to estimate spatiotemporal variations in soil water content under field conditions. The model was validated against field measurements, achieving a correlation coefficient of $R^2 > 0.8$ for volumetric water content. Two scenarios, representing a grassed area and a swale, were analysed to assess water transfers to the subsurface. The results enable the quantification of water variations within the loamy horizon and the recharge potential of the Senonian–Turonian aquifer. They also highlight the influence of specific weathering facies on flow dynamics.

MOTS CLÉS

Gestion durable et intégrée des eaux pluviales, Limon, Modèle hydro-géophysique, Noues, Zone non saturée

1 INTRODUCTION

La caractérisation du flux d'infiltration en zone non saturée est essentielle pour évaluer le potentiel de recharge des nappes dans un contexte de dérèglement climatique (Lu et al., 2025), mais elle reste difficile en raison de l'hétérogénéité des sols (Schwartz et al., 2008). Les méthodes géophysiques, notamment la tomographie de résistivité électrique (ERT), sont de plus en plus utilisées pour suivre les variations spatiotemporelles des propriétés hydrauliques et hydrogéologiques (Kalinski & Kelly, 1993 ; Loperte et al., 2016 ; Jordy et al., 2019).

En laboratoire, des modèles pétrophysiques reliant résistivité et teneur en eau ont été développés, notamment pour des sols sableux ou loessiques (Zou et al., 2023 ; Cui et al., 2025), en calibrant un modèle hydro-géophysique basé sur la loi d'Archie couplé à un modèle d'écoulement non saturé Van Genuchten (1980). Toutefois, ces approches laboratoire sont limitées par l'homogénéité des échantillons. Des études in situ ont également été menées pour établir des relations résistivité–teneur en eau plus représentatives (Nijland et al., 2010 ; Alamry et al., 2017), tout en soulignant l'influence de la teneur en argile sur la qualité des résultats.

Le couplage hydro-géophysique, d'une part via les mesures de la résistivité électrique ERT, et d'autre part, via la simulation numérique des écoulements en zone non saturée via HYDRUS 2D (Simunek et al., 2024) et le modèle Van Genuchten-Mualem, permet également de suivre le front d'infiltration et d'estimer les paramètres hydrauliques (Farzamian et al., 2015).

Dans ce contexte, cette communication développe un modèle hydro-géophysique combinant mesures de résistivité et simulations en zone non saturée pour suivre l'infiltration au niveau de noues d'infiltration et évaluer leur contribution à la recharge des nappes.

2 MATERIELS ET METHODES

2.1 Site expérimental

Cette étude a été réalisée sur le site expérimental « ETAGEP ». C'est un site expérimental conçu au niveau de la Cité Scientifique, Université de Lille, pour étudier la réponse hydrologique des noues d'infiltration. Financé par l'Agence de l'eau Artois Picardie, la Métropole Européenne de Lille et la région Hauts-de-France, les études menées sur ce site visent également à évaluer l'amélioration de la performance hydrologique des noues par l'effet de la faune et de flore.

Le site se situe dans une zone caractérisée par la présence d'une couverture limoneuse (loess), de 4 m d'épaisseur, reposant sur la craie séno-turonienne d'âge Crétacé (Cary et al., 2014, Darwishe et al., 2017, El Khattabi et al., 2018). Cette formation crayeuse représente la principale ressource en eau potable de la métropole (Bernard et al., 2008, Serhal et al., 2009). La nappe phréatique, se situant entre 10 m et 12 m de profondeur au droit du site.

Le site dispose de 12 noues d'infiltration (Figure 1) : la longueur des noues est de 5 m, leur largeur de 2 m et leur profondeur de 0.25 m pour un volume de stockage maximal de 1.68 m³. Les noues gèrent les eaux pluviales de surfaces imperméabilisées de dimensions différenciées (0 m², 50 m² et 100 m² d'imperméabilisation) pour étudier la réponse hydrologique des noues selon les superficies drainées.

Pour suivre la réponse hydrologique des noues, un capteur de niveau d'eau a été installé dans chaque noue, permettant de suivre en continu la variation des hauteurs d'eau en fonction du temps. Un capteur de teneur en eau volumique à 9 positions type SoilVue a également été installé au milieu des noues pour évaluer les variations de la teneur en eau volumique. Une station météorologique a été mise en place sur le site. Un pluviomètre à auget permet de suivre les cumuls de précipitations et la construction des hyétogrammes des épisodes pluvieux. La station météo est également équipée de capteurs de température et d'humidité de l'air, de pression atmosphérique, de vitesse du vent et de rayonnement net. L'ensemble des capteurs a été configuré avec un pas de temps de mesure de 10 minutes. Les données sont automatiquement envoyées par télétransmission (FTP) aux serveurs dédiés au projet.

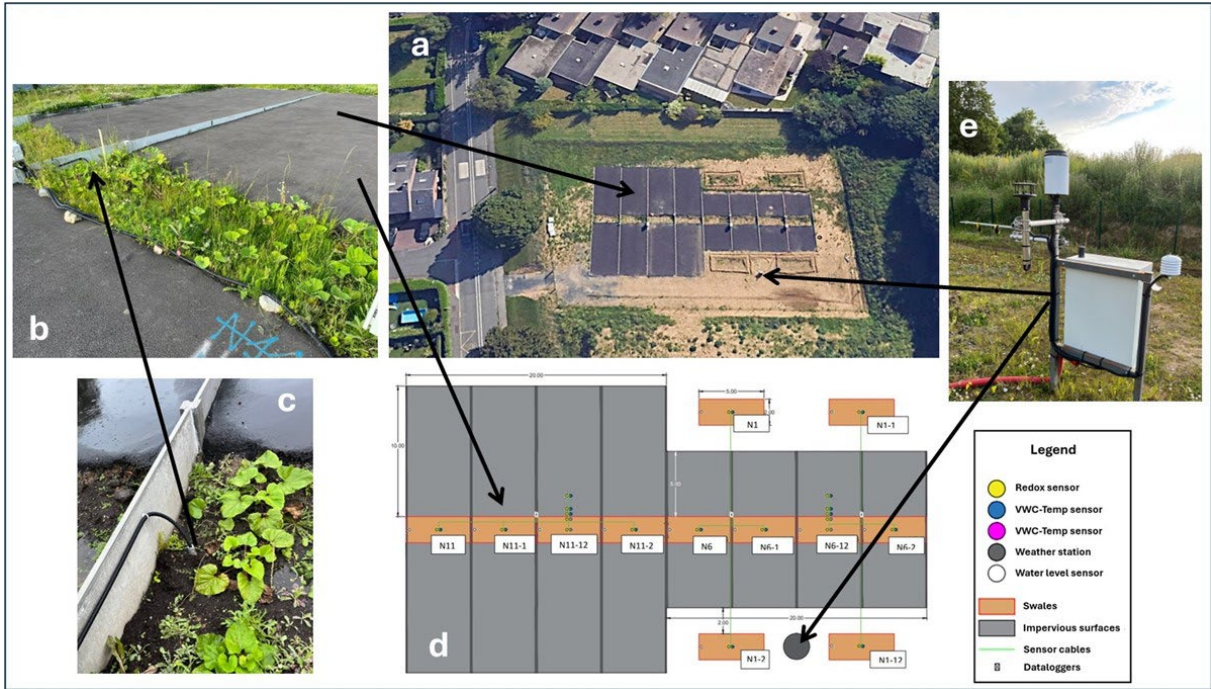


Figure 1 : Site expérimental ETAGEP et instrumentation

2.2 Modèle conceptuel

Un modèle conceptuel a été développé pour décrire la variabilité spatio-temporelle de la teneur en eau dans le sol (Figure 2). Cette approche se base, d'une part sur les mesures de résistivité électrique par ERT, et d'autre part, sur les simulations des écoulements en milieu non saturée sur HYDRUS. Les simulations sont validées à partir des valeurs de teneur en eau volumique mesurées sur le terrain (capteurs TDR).

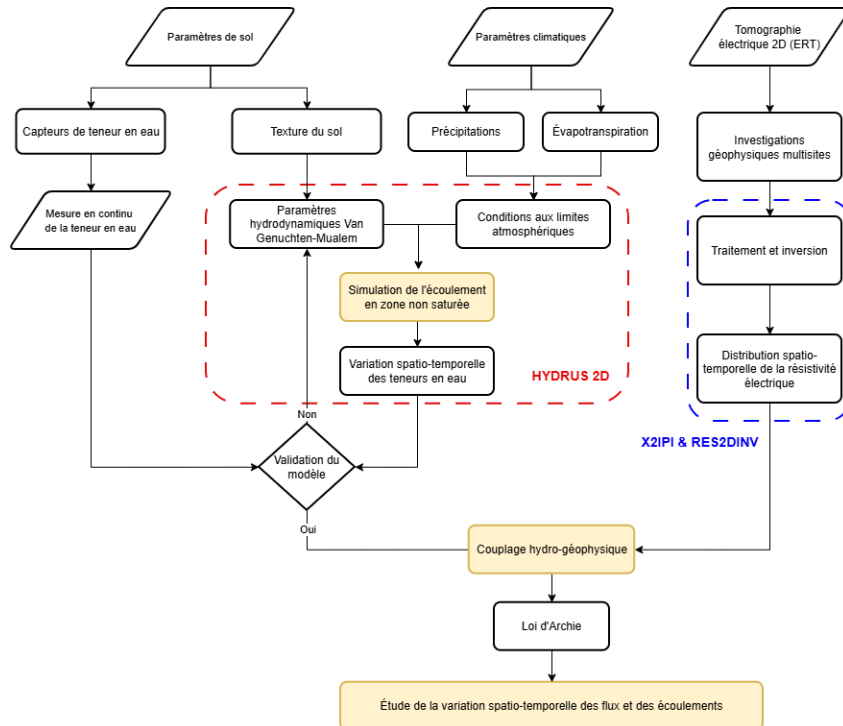


Figure 2 : Modèle conceptuel développé pour l'étude de la variabilité spatio-temporelle des teneurs en eau

2.3 Tomographie électrique 2D (ERT)

L'étude a été réalisée sur le site ETAGEP. 2 profils électriques ont été retenus : un profil (ERT1) au niveau de la zone engazonnée, sur une longueur de 50 m, et un second profil, au droit des noues, sur une longueur de 50 m (Figure 3). L'équipement utilisé est Terrameter LS, connecté à un boîtier ES1064C. Le dispositif de montage retenu est le dispositif Wenner. Un prétraitement des données a été effectué sur le logiciel X2IPI. L'inversion des résistivités a été réalisée sur le logiciel RES2DINV.

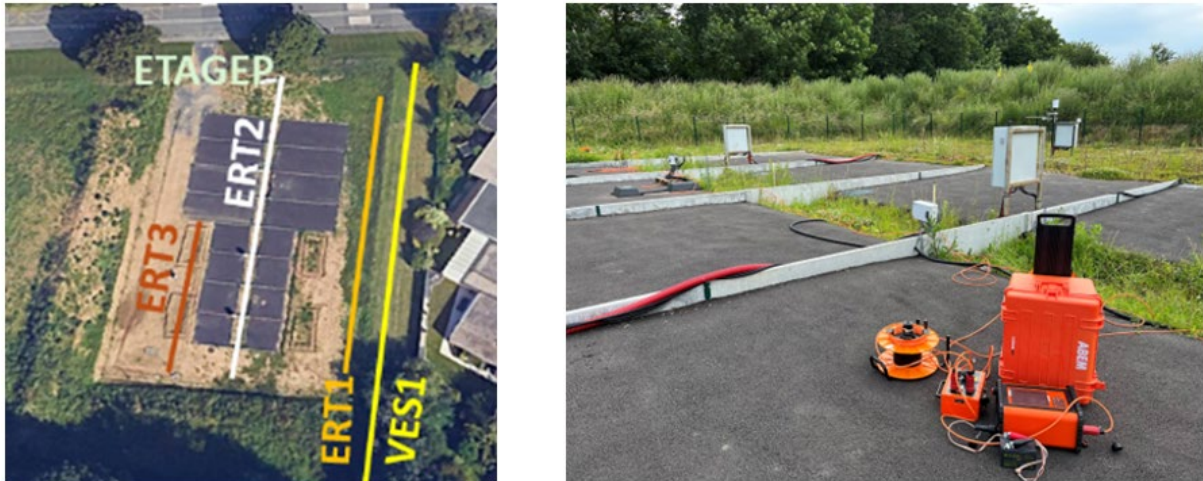


Figure 3 : Site ETAGEP et positionnement des profils ERT

2.4 Modélisation sur HYDRUS

Les modélisations ont été réalisées sur le logiciel HYDRUS 2D/3D, un logiciel de simulations des écoulements bidimensionnels et tridimensionnels de l'eau, de la chaleur et des solutés en milieu poreux. Il est configuré pour résoudre l'équation de Richards pour décrire les écoulements de l'eau en milieu non saturé et les équations de convection-dispersion pour le transport de chaleur et de solutés. Le modèle retenu pour réaliser les modélisations est le modèle Van Genuchten-Mualem, il est largement utilisé dans les modélisations des écoulements en milieu poreux (Zhao et al., 2024), les couplages pétrophysiques et plus spécifiquement le développement de modèles hydro-géophysiques pour le suivi des flux d'infiltration (Farzadian et al., 2015).

Le domaine généré est de 5 m de largeur et 10 m de profondeur, avec un maillage de 10 cm pour favoriser la convergence du modèle. 5 couches de sol ont été intégrées, avec des propriétés hydrodynamiques propres à chaque couche. La teneur en eau initiale fixée sur l'ensemble du modèle est de 25%. Les précipitations, ont été mesurées au niveau du terrain expérimental, ont été intégrées au modèle. Le ruissellement résultant a été estimé selon les dimensions des bassins versants. L'évapotranspiration potentielle a été estimée par le modèle Penman Monteith FAO-56 (Allen et al., 2006).

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Tomographie électrique 2D (ERT)

La tomographie électrique a été réalisée sur les 2 profils retenus, à savoir au niveau de terrain engazonné et le long des noues, entre le 19/06/2024 et le 19/07/2024 (Figure 4). Du fait des apports importants d'eau provenant du ruissellement sur les surfaces imperméabilisées, la résistivité électrique, sur la partie gauche du transect, est faible, indiquant une forte saturation des horizons limoneux (4 m de profondeur au niveau du site). Sur la partie droite, dont les noues sont connectées à des surfaces imperméabilisées de plus faible surface, la résistivité est un peu plus élevée, indiquant une saturation moins importante.

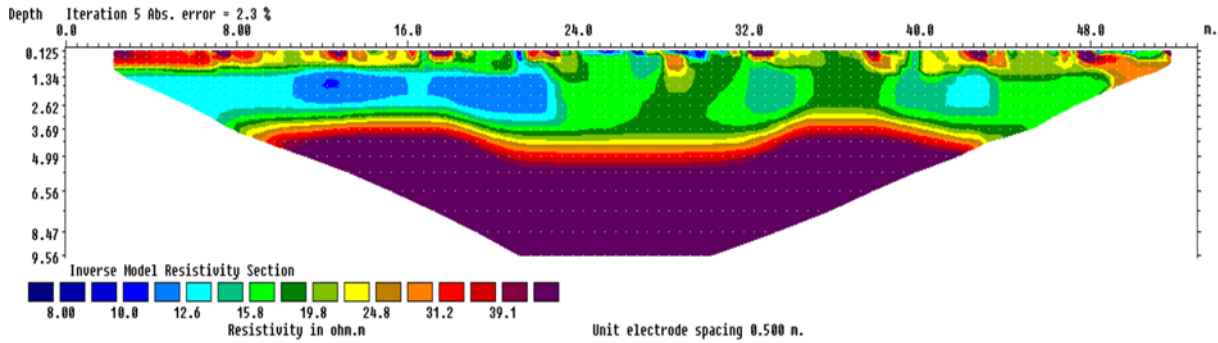


Figure 4 : Profil ERT au droit des noues (19/06/2024)

3.2 Simulation de l'infiltration

Les résultats présentés ci-après (Figure 5) portent sur les modélisations des variations spatio-temporelles des teneurs en eau au droit des noues N11 (à gauche), N6 (au milieu) et N1 (à droite) pour la période allant du 19/06/2024 (16,7 mm en 24h) au 21/06/2024. La validation du modèle a été effectuée en comparant les résultats des modélisations relatives aux variations temporelles des teneurs en eau volumique aux données des capteurs TDR mis en place au niveau des noues. Les coefficients de corrélations R^2 obtenus sont satisfaisants : ils sont supérieurs à 0.8 pour un R^2 maximal de 0.91.

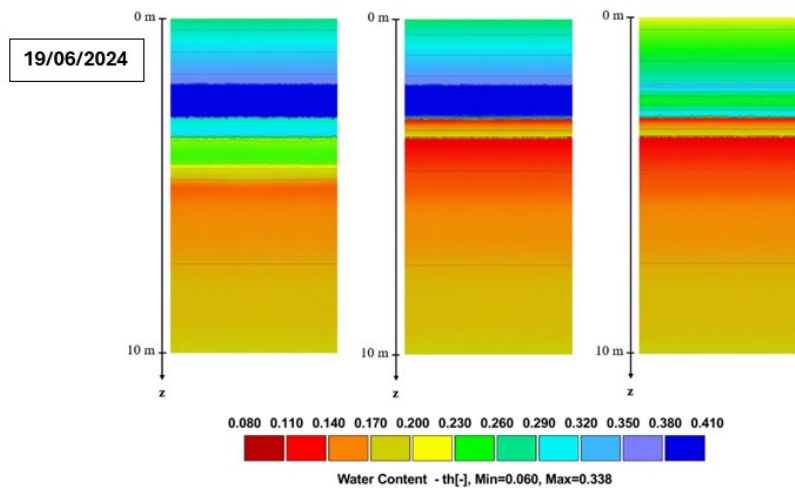


Figure 5 : Simulation de l'infiltration au droit des noues et sur la zone engazonnée

3.3 Couplage hydro-géophysique et bilan

Le modèle hydro-géophysique a été effectué selon la loi d'Archie (Figure 6), reliant les valeurs en teneurs en eau simulées aux mesures de résistivité électrique des couches limoneuses (soit les 2 premiers mètres) en combinant les résultats des 3 configurations. Le modèle obtenu présente un bon coefficient de corrélation ($R^2 = 0,78$).

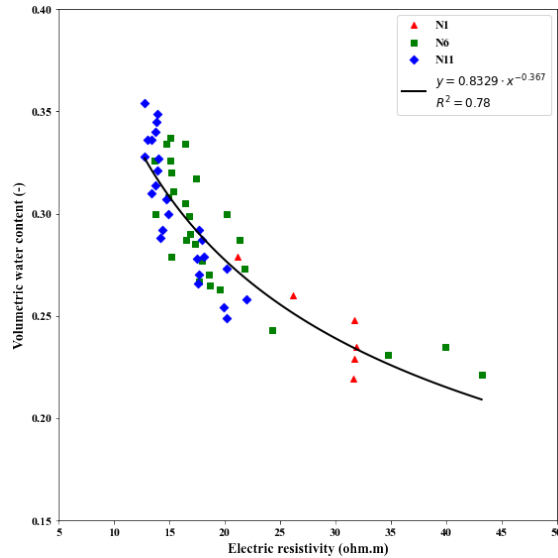


Figure 6 : Couplage hydro-géophysique par la loi d'Archie de la résistivité électrique et de la teneur en eau

Le modèle hydro-géophysique permet de définir, pour toute valeur de résistivité électrique, la valeur de teneur en eau volumique équivalente. Ce modèle permet donc de décrire, de manière volumétrique, la quantité d'eau présente dans le sol, et de suivre les variations spatio-temporelles des volumes d'eau à chaque profondeur. Ainsi, une estimation des volumes d'eau dans le sol a été réalisée en calculant, à partir des données de résistivité électrique du domaine d'étude, les teneurs en eau volumique à chaque nœud (Figure 7). En l'absence de précipitations les 19 et 20 juin, une diminution du stock d'eau dans le sol a été observée au cours de ces deux journées, passant de 22,86 m³ le 19 juin à 22,54 m³ le 20 juin. Les précipitations enregistrées le 21 juin expliquent l'augmentation ultérieure du volume, qui atteint 22,58 m³ pour la couche de sol comprise entre 0 et 2 m de profondeur.

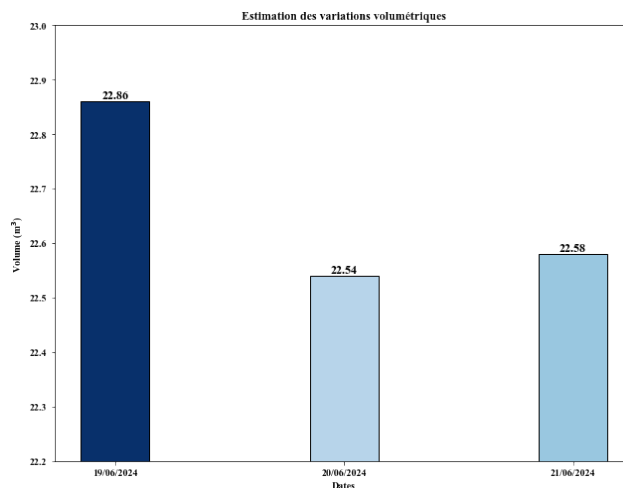


Figure 7 : Variation du stock d'eau dans le sol entre 0 et 2 m de profondeur

4 CONCLUSION

Un modèle hydro-géophysique a été développé pour étudier la variabilité spatio-temporelles des flux d'infiltration, en combinant les mesures de la résistivité électrique par tomographie 2D ERT et les simulations des écoulements en zone non saturée, au droit des noues et sur la surface engazonnée. Cette approche non destructive permet de suivre les flux d'infiltration et démontrer la contribution des noues d'infiltration dans la recharge des nappes phréatiques. La méthodologie développée présente un fort potentiel pour la gestion opérationnelle des aménagements GDIEP, notamment pour l'évaluation des apports hydriques des ouvrages tels que les noues, bassins d'infiltration ou zones végétalisées.

BIBLIOGRAPHIE

- Alamry, A. S., van der Meijde, M., Noomen, M., Addink, E. A., van Benthem, R., & de Jong, S. M. (2017). Spatial and temporal monitoring of soil moisture using surface electrical resistivity tomography in Mediterranean soils. *Catena*, 157, 388-396.
- Allen, R. G., Pruitt, W. O., Wright, J. L., Howell, T. A., Ventura, F., Snyder, R., ... & Elliott, R. (2006). A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural water management*, 81(1-2), 1-22.
- Bernard, D., El Khattabi, J., Lefevre, E., Serhal, H., Bastin-Lacherez, S., & Shahrour, I. (2008). Origin of nickel in water solution of the chalk aquifer in the north of France and influence of geochemical factors. *Environmental geology*, 53(5), 1129-1138.
- Cary, L., Benabderraziq, H., Elkhatabi, J., Gourcy, L., Parmentier, M., Picot, J., ... & Négrel, P. (2014). Tracking selenium in the Chalk aquifer of northern France: Sr isotope constraints. *Applied Geochemistry*, 48, 70-82.
- Cui, B., Gu, T., Wang, J., Li, J., Fan, N., Li, X., ... & Hao, M. (2025). Analysis of seepage and hysteresis effect mechanism of unsaturated loess based on resistivity test. *Journal of Hydrology*, 653, 132749.
- Darwishe, H., Khattabi, J. E., Chaaban, F., Louche, B., Masson, E., & Carlier, E. (2017). Prediction and control of nitrate concentrations in groundwater by implementing a model based on GIS and artificial neural networks (ANN). *Environmental earth sciences*, 76(19), 649.
- El Khattabi, J., Carlier, E., & Louche, B. (2018). The effect of rock collapse on coastal cliff retreat along the chalk cliffs of Northern France. *Journal of Coastal Research*, 34(1), 136-150.
- Farzamian, M., Santos, F. A. M., & Khalil, M. A. (2015). Estimation of unsaturated hydraulic parameters in sandstone using electrical resistivity tomography under a water injection test. *Journal of applied geophysics*, 121, 71-83.
- Green, W. H., & Ampt, G. A. (1911). Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, 4(1), 1-24.
- Jodry, C., Lopes, S. P., Fargier, Y., Sanchez, M., & Cote, P. (2019). 2D-ERT monitoring of soil moisture seasonal behaviour in a river levee: A case study. *Journal of Applied Geophysics*, 167, 140-151.
- Kalinski, R. J., & Kelly, W. E. (1993). Estimating water content of soils from electrical resistivity. *Geotechnical Testing Journal*, 16(3), 323-329.
- Loperte, A., Soldovieri, F., Palombo, A., Santini, F., & Lapenna, V. (2016). An integrated geophysical approach for water infiltration detection and characterization at Monte Cotugno rock-fill dam (southern Italy). *Engineering Geology*, 211, 162-170.
- Lu, Z., Zhang, J., Yan, D., Li, C., Lei, G., Dong, Z., & Ma, Q. (2025). Quantitative study of the impact of land use change on groundwater level in the Songnen Plain, China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 59, 102452.
- Nijland, W., Van der Meijde, M., Addink, E. A., & De Jong, S. M. (2010). Detection of soil moisture and vegetation water abstraction in a Mediterranean natural area using electrical resistivity tomography. *Catena*, 81(3), 209-216.
- Schwartz, B. F., Schreiber, M. E., & Yan, T. (2008). Quantifying field-scale soil moisture using electrical resistivity imaging. *Journal of Hydrology*, 362(3-4), 234-246.
- Serhal, H., Bernard, D., Khattabi, J. E., Sabine, B. L., & Shahrour, I. (2009). Impact of fertilizer application and urban wastes on the quality of groundwater in the Cambrai Chalk aquifer, Northern France. *Environmental geology*, 57(7), 1579-1592.
- Šimůnek, J., Brunetti, G., Jacques, D., van Genuchten, M. T., & Šejna, M. (2024). Developments and applications of the HYDRUS computer software packages since 2016. *Vadose Zone Journal*, 23(4), e20310.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- Zhao, Y., Yi, J., Yao, R., Li, F., Hill, R. L., & Gerke, H. H. (2024). Dimensionality and scales of preferential flow in soils of Shale Hills hillslope simulated using HYDRUS. *Vadose Zone Journal*, 23(4), e20367.
- Zou, C., Zhang, S., Jiang, X., & Chen, F. (2023). Monitoring and characterization of water infiltration in soil unsaturated zone through an integrated geophysical approach. *Catena*, 230, 107243.