



HAL
open science

Suivi de l'infiltration sur le site expérimental hydrogéologique de Poitiers par tomographie de résistivité électrique

Clémence Pavageau, Pierre Fischer, Gilles Porel, Laurent Caner

► **To cite this version:**

Clémence Pavageau, Pierre Fischer, Gilles Porel, Laurent Caner. Suivi de l'infiltration sur le site expérimental hydrogéologique de Poitiers par tomographie de résistivité électrique. E3S Web of Conferences, 2024, 504, pp.05004. 10.1051/e3sconf/202450405004 . hal-04590153

HAL Id: hal-04590153

<https://hal.science/hal-04590153>

Submitted on 28 May 2024

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.

Monitoring infiltration at hydrogeological experimental site of Poitiers by electrical resistivity tomography

Suivi de l'infiltration sur le site expérimental hydrogéologique de Poitiers par tomographie de résistivité électrique

Clémence Pavageau¹, Pierre Fischer¹, Gilles Porel¹, and Laurent Caner¹

¹ IC2MP, Université de Poitiers, CNRS UMR 7285, HydrASA, Poitiers, France

Abstract. Two electrical resistivity tomography profiles were installed at the Hydrogeological Experimental Site of Poitiers (HES) to monitor the water infiltration in the soil, one with a length of 47 meters and the other with a length of 23 meters. Six electrical apparent resistivity measurements were conducted between July 18, 2023, and November 17, 2023, to calculate the difference in apparent resistivity to a dry profile and determine the variation of soil moisture content. Additionally, sensors were installed in a 2-meter-high flux tower, enabling the collection of hydrological (rainfall, soil water content) as well as the calculation of evapotranspiration. After four months of continuous monitoring and the calculation of resistivity differences, a coherence between meteorological and geophysical data has been established, yielding positive preliminary results. These results suggest the potential application of these data in a dynamic hydro-geophysical model in time lapse to study the hydrological water balance at the HES.

Résumé. Le Site Expérimental Hydrogéologique de Poitiers (SEH) a été le lieu d'implantation de deux profils de résistivité électrique, l'un de 47m et l'autre de 23m. Six acquisitions de résistivités apparentes ont été réalisées entre le 18 juillet 2023 et le 17 novembre 2023 afin de calculer les différences de résistivités avec un profil sec et d'obtenir la variation de teneur en eau du sol. Parallèlement, l'installation de différents capteurs sur une station micro-météorologique à 2 mètres de hauteur a permis l'obtention de données hydrologiques (pluviométrie, teneur en eau du sol) et la réalisation de calculs d'évapotranspiration. Après 4 mois de suivi des mesures et le calcul des différences de résistivités, une cohérence entre les données météorologiques et la géophysique est établie et les premiers résultats sont encourageants. Ils permettent d'envisager leur utilisation dans un modèle hydro-géophysique dynamique en time-lapse pour étudier le bilan hydrologique sur le SEH.

*Corresponding author: clemence.pavageau@univ-poitiers.fr

1 Introduction

Les chroniques de mesures des stations météorologiques en Nouvelle-Aquitaine montrent une évolution de la répartition mensuelle de la pluviométrie, bien que les variations annuelles demeurent peu variables. Cette évolution s'explique par des différences de fréquence et d'intensité des événements pluvieux dans le contexte de changements climatiques. Elle interroge sur la disponibilité de l'eau pour les nappes d'eau souterraines. Dans ce contexte, l'étude de la recharge de l'aquifère du Dogger, principale réserve d'eau dans le nord de la région Nouvelle-Aquitaine, devient un enjeu incontournable pour les prochaines années. C'est ainsi qu'a été mise en place l'étude des écoulements au sein de la zone non saturée du Site Expérimental Hydrogéologique (SEH) de l'université de Poitiers.

Le SEH a été créé au début des années 2000. Son fonctionnement est assuré par l'équipe de recherche HydrASA de l'Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers (IC2MP). Il est implanté sur un terrain de 35 hectares en région Poitou-Charentes, à 2km au Sud-Est de Poitiers, sur la commune de Mignaloux Beauvoir, au lieu-dit du Deffend (Figure 1). Le site est inscrit dans le Service National d'Observation hydrogéologique H+ (SNO H+), (<https://hplus.ore.fr/poitiers/description-poitiers>) associé aux observatoires français de la zone critique de l'infrastructure de recherche OZCAR.

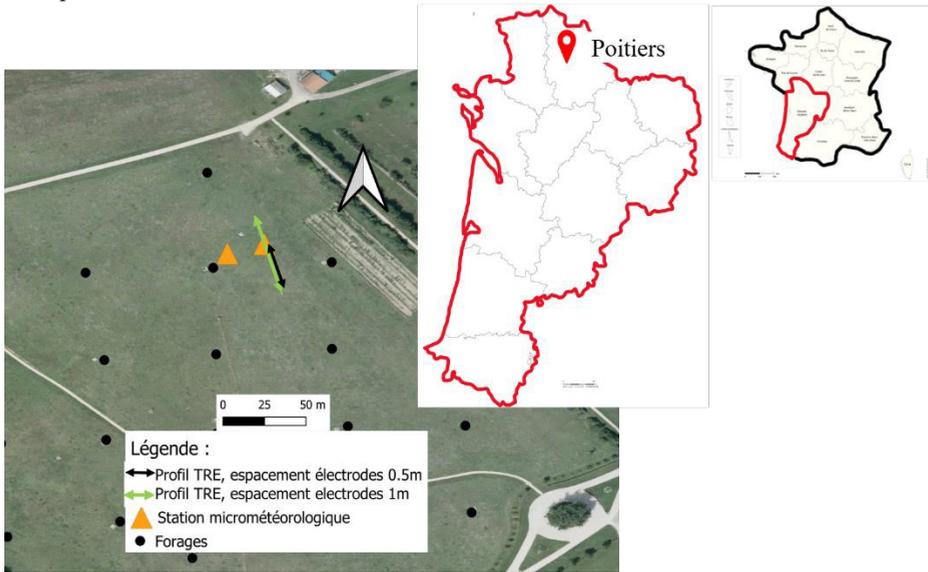


Fig. 1. Localisation du site expérimental hydrogéologique (SEH) de l'université de Poitiers et de ses équipements de mesures.

Le site se situe au Sud du bassin parisien, proche du seuil du Poitou. La géologie sur le site expérimental est constituée d'un socle granitique daté du Précambrien à 130m de profondeur surmonté d'un lit marneux, mis en place au Toarcien, dû à un régime marin franc [1]. Du Jurassique inférieur au Crétacé se crée une couverture sédimentaire carbonatée détritique par une alternance de phases de transgressions / régressions marines [2], qui se traduit au niveau du site expérimental par 3 niveaux de calcaire. Durant l'Eocène, une régression marine met à nu, par érosion, les calcaires du Jurassique moyen (Dogger) et entraîne leur karstification [3, 4]. Aujourd'hui, l'aquifère karstifié supra Toarcien est la principale réserve d'eau potable au Nord de la région Nouvelle-Aquitaine.

Au Tertiaire et Quaternaire, la formation d'un niveau sédimentaire composé de limons de plateaux avec des mélanges de matériaux fins recouvre les calcaires du Jurassique Moyen sur 3 à 30m de profondeur [2].

Les objectifs scientifiques du SEH sont le développement de nouvelles méthodologies et connaissances sur les milieux calcaires fracturés grâce à l'acquisition de données expérimentales alimentant les recherches théoriques. Le site est équipé d'une quarantaine de forages permettant d'effectuer des mesures ponctuelles et des suivis des niveaux de la nappe du Dogger. Au cours des dernières décennies, de nombreuses études ont été réalisées sur la zone saturée.

L'équipement pour le suivi du transfert de l'eau dans la zone non saturée a été mis en place plus récemment, afin d'étudier le bilan hydrologique au niveau du site : répartition des pluies entre infiltration, ruissellement et évapotranspiration. La méthode de tomographie de résistivité électrique (TRE) en time lapse, régulièrement utilisée en hydro-géophysique de la zone non saturée [5], a été choisie pour suivre l'infiltration. Cette technique permet de suivre les variations de la teneur en eau du sol sans être invasive et sur de grands volumes de sol, même hétérogènes [6]. L'évolution de l'infiltration au cours du temps au SEH peut être mise en lien avec la pluie et l'évapotranspiration, à partir des mesures d'une station micro-météorologique.

L'objectif de ce papier est donc de montrer les premiers résultats de suivi d'infiltration de l'eau obtenus par tomographie de résistivité électrique sur le site expérimental de l'Université de Poitiers et de montrer les perspectives envisagées pour le futur afin d'améliorer l'interprétation de ces résultats.

2 Méthodologie / Instrumentation

2.1 Suivi de l'infiltration par profils TRE en time-lapse

Afin de suivre l'infiltration de l'eau dans le sol, deux profils de tomographie de résistivité électrique en time-lapse ont été mis en place sur le SEH. La résistivité mesurée dépend notamment de la nature des constituants, du degré de saturation en eau ou encore la température du sol au moment de la mesure [7, 8].

Le lieu d'implantation des profils a été choisi à partir d'une étude du site par tomographie de résistivité électrique au printemps 2023 qui a montré un sol majoritairement argileux (résistivités comprises entre 2 à 55 ohm.m) avec présence de poches plus résistives (de 55 à 200 ohm.m). L'infiltration est visible par la diminution des résistivités électriques dans le temps, elle est donc compliquée à observer sur des sols argileux qui ont une faible résistivité. Les profils pour le time-lapse ont été installés au nord du site, sur une zone de plus forte résistivité pour espérer suivre l'infiltration des eaux de pluie grâce à des variations de résistivités plus importantes (Figure 1).

Un premier profil électrique fait 47m de long avec 48 électrodes espacées de 1m. L'objectif de ce profil est de suivre l'infiltration sur un milieu hétérogène avec une bonne résolution jusqu'à 5m de profondeur. Le deuxième profil est inséré au sein du premier, avec un espacement d'électrodes de 0,5m sur 23m. Il est centré sur la 16ème électrode du profil 1m (Figure 2). L'objectif du profil d'espacement 0,5m est de mesurer l'infiltration avec une meilleure résolution à proximité de la surface. Il est positionné de façon à mieux observer une zone intéressante du grand profil où les résistivités sont plus fortes.

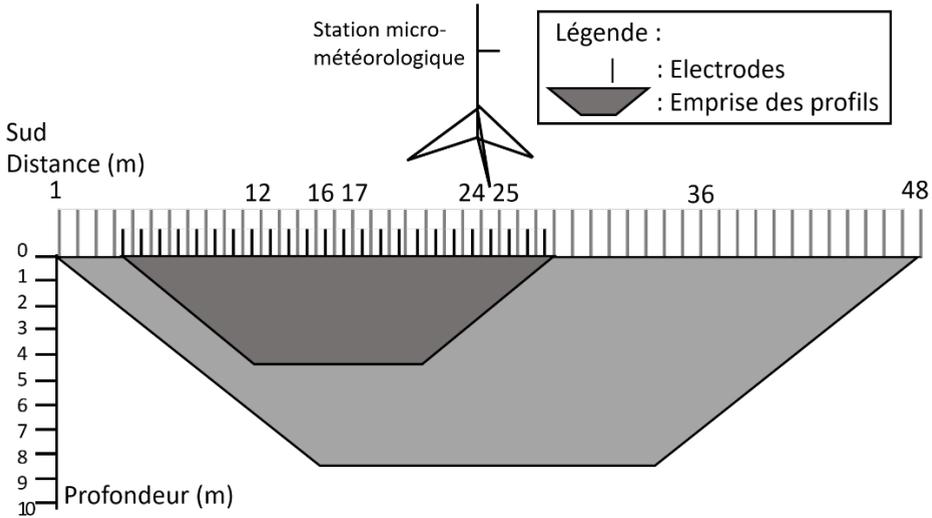


Fig. 2. Schéma d'instrumentation pour le suivi hydrologique de l'infiltration par tomographie de résistivité électrique et station micro-météorologique sur le site expérimental hydrogéologique de Poitiers.

Les acquisitions de résistivité électrique ont été réalisées avec un Syscal Switch (Iris Instruments). Les séquences comportent 529 quadripôles suivant une configuration Wenner-Schlumberger. Les mesures génèrent des valeurs de résistivités apparentes qui peuvent être utilisées brutes ou être inversées avec le logiciel Res2DInv®. L'inversion est faite pour une température de référence de 25°C, or les variations de températures du sol au cours du temps ont une influence sur les résultats, une différence de 12°C peut amener jusqu'à 30% de variation de la résistivité électrique [7]. Pour pouvoir comparer les résultats d'inversion entre eux il faut recalculer les résistivités inversées pour une température standard plus proche des températures moyennes du sol sur une année. Les valeurs de résistivités standard (σ_{std}) sont recalculées à partir de la conductivité électrique après inversion (σ_i), la température standard (T_{std}) choisie, la température in situ (T_i) au moment de la mesure et un facteur m (Equation 1). La valeur m est la pente de la droite donnant le meilleur ajustement sur la courbe des conductivités normalisées (à partir de la température de référence 25°C) en fonction des températures [8].

$$\sigma_{std} = \left[\frac{m(T_{std}-25)+1}{m(T_i-25)+1} \right] \sigma_i \quad (1)$$

Les profils de résistivité peuvent être comparés entre eux par inversion en time-lapse. Pour cela il faut définir un profil de référence qui correspond aux mesures de résistivités les plus importantes, lorsque la teneur en eau est la plus faible. L'analyse en time lapse consiste à soustraire les valeurs de résistivités inversées et corrigées de la température, par rapport à celles du profil de référence. La différence montre les variations de résistivités liées aux variations de teneur en eau du sol [5, 9] qui est le seul paramètre variant entre deux acquisitions (lorsque les corrections de température sont faites). Ces variations peuvent être associées directement avec des valeurs de teneurs en eaux, à partir de relations pétrophysiques établies pour le sol investigué. Dans ce papier, des profils de résistivités inversées sont utilisés pour montrer la distribution verticale des horizons du sol du SEH. Les différences de résistivités, pour observer l'infiltration, seront faites sur les résistivités

apparentes mesurées, pour éviter les artéfacts pouvant être liés à la correction des températures (qui n'a pas encore pu être réalisée) et à la non-unicité de l'inversion.

2.2 Suivi de la pluie et l'évapotranspiration par station micro-météorologique

Une station micro météorologique est installée au milieu du profil électrique. Elle réalise un suivi continu de la température du sol, qui pourra être utilisée pour la correction des résistivités électriques interprétées, et de la teneur en eau du sol, qui permet d'identifier le profil de référence en temps sec. La température moyenne du sol est mesurée par un ensemble de 4 sondes températures (le TCAV-L, Campbell Scientific) implantées dans le sol à 0,5cm, 6 cm, 10cm et 15cm de la surface du sol. Dans la même zone une sonde de mesure de teneur en eau volumique du sol (CS650, Campbell Scientific) avec des tiges en acier inoxydables de 12cm est installée. Cette sonde mesure également la conductivité électrique et la température du sol. La station micro-météorologique, ou tour à flux, permet aussi un suivi de la pluviométrie, avec un pluviomètre à auget relié à la centrale d'acquisition.

L'ensemble des mesures réalisées sur la station permet de calculer l'évapotranspiration, avec un pas de temps de 30 min, par trois approches différentes. La méthode de Penman-Monteith donne l'évapotranspiration potentielle (ETP), souvent utilisée comme référence. Elle donne l'ET maximale quand la disponibilité de l'eau n'est pas limitante [10]. Le code de calcul Easy Flux (Campbell Scientific) pour la centrale d'acquisition de la tour à flux, permet de calculer des valeurs d'évapotranspiration réelle (ETR). Cette approche utilise la méthode d'eddy covariance pour calculer l'ETR à partir des mesures de densité de gaz et de vitesse de vent de la tour à flux. La méthode de Production d'Entropie Maximal (MEP) permet également un calcul de l'ETR (Equation 2). Elle se base sur l'équilibre énergétique $R_n = H + E + G$ (R_n = Rayonnement net, H = flux de chaleur sensible, E = flux de chaleur latente et G = flux de chaleur du sol) pour mesurer l'évaporation (E_v) puis la transpiration (Tr), et associer ces deux valeurs avec un coefficient de végétation (f_{veg}) [11, 12].

$$ET = (1 - f_{veg}) * E_v + f_{veg} Tr \quad (2)$$

Les chroniques de mesures permettent de mettre en relation l'infiltration suivie par TRE en time-lapse avec les précipitations et l'évapotranspiration mesurées, pour réaliser un bilan hydrologique qui consiste en un bilan des entrées et sorties de l'eau dans un système. L'entrée principale est la pluviométrie et les sorties sont l'évapotranspiration estimée avec les données de la tour à flux, l'infiltration estimée par la TRE et le ruissellement (non mesuré pour l'instant).

3 Résultats

3.1 Données hydrologiques sur le SEH

Depuis l'installation de la station micro-météorologique, en juillet 2023, le suivi des données hydro-météorologiques permet de connaître la pluviométrie journalière, l'évapotranspiration et la teneur en eau du sol à 10cm.

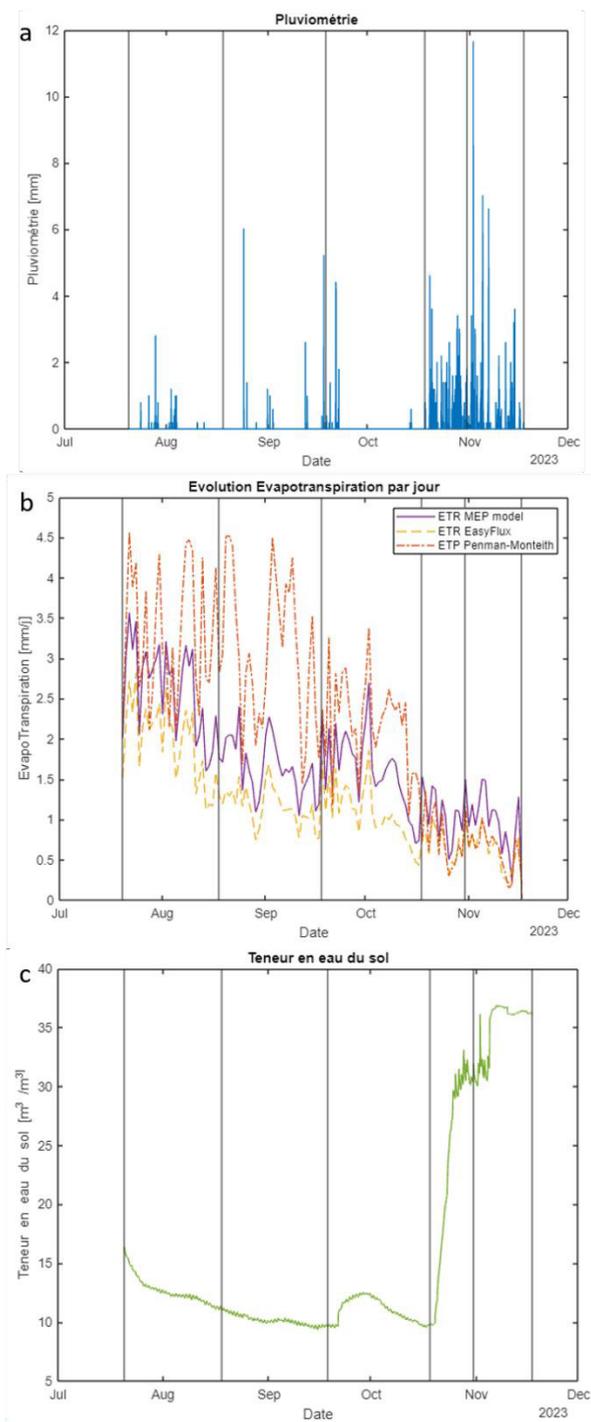


Fig. 3. Variables des données hydrologiques sur le SEH entre le 20 juillet et le 17 novembre 2023. Les repères verticaux (bandes noires) marquent les mesures de TRE. a) Pluviométrie sur le SEH. b) Evolution de l'évapotranspiration réelle selon la méthode MEP et Easy Flux et potentielle avec la méthode Penman. c) Teneur en eau du sol à 10cm de profondeur.

Le diagramme des pluies (Figure 3a) témoigne d’une vingtaine de jours de pluie entre fin juillet et début octobre. Un évènement pluvieux important, avec de fortes pluies continues sur plusieurs jours, arrive à partir de milieu octobre, générant un fort contraste entre la période juillet-octobre et octobre-novembre.

Le graphique de l’évapotranspiration (ET) (Figure 3b) permet de comparer les trois méthodes de calcul (EasyFlux : courbe jaune pointillé, Penman-Monteith : courbe rouge point tiret et MEP : courbe violette trait continu). Les trois méthodes montrent des variations similaires : une forte évapotranspiration en juillet – aout entre 2.5 et 3mm/j et une diminution progressive, suivie d’une stabilisation de l’ET journalière autour de 1mm/j à partir de mi-octobre et l’arrivée des pluies quotidiennes. L’ETR fourni par la méthode EasyFlux donne des valeurs systématiquement inférieures à celle obtenus avec la méthode MEP. C’est la méthode EasyFlux qui semble la plus adaptée à notre environnement car en période humide (Novembre) les résultats se rapprochent, jusqu’à parfois se confondre, avec l’ETP de Penman tandis que la méthode MEP fournit des valeurs supérieures à l’ETP, ce qui est incohérent.

La sonde de teneur en eau situé à 10cm de profondeur montre une diminution d’humidité du sol entre fin juillet et milieu septembre de 15.8% à 9.5% (Figure 3c). Les pluies de fin septembre ont entraîné une augmentation de teneur en eau à 12.5%, mais elle redescend rapidement à 9.5%. Depuis le 20 octobre les pluies récurrentes provoquent une augmentation rapide de la teneur en eau jusqu’à 36.8%.

Ces données montrent qu’il y a une première période de juillet à octobre avec peu de pluie, donc peu d’entrée d’eau dans le bilan hydrologique sur le SEH, puis une deuxième avec une entrée d’eau importante due aux pluies récurrentes.

3.2 Suivi de l’infiltration dans le sol par différence de résistivité électrique apparente mesurée

L’objectif des mesures de résistivité électrique en time-lapse est d’observer les variations de teneur en eau dans le sol et ainsi de faire un suivi de l’infiltration. Pour cela, une référence doit être mesurée sur un sol sec, avec la teneur en eau la plus basse. Dans ce papier le profil de résistivité électrique du 18 octobre 2023 est choisi comme référence.

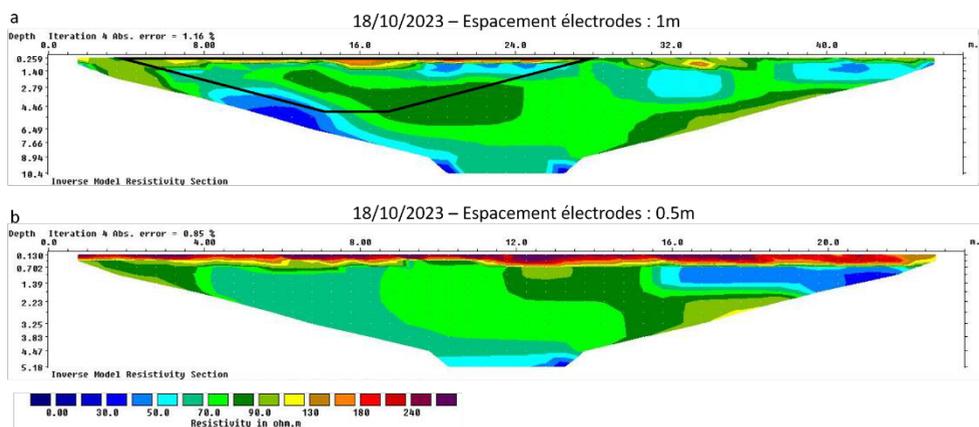


Fig. 4. Profils de résistivités inversées du 18 octobre 2023, date avec le sol à la teneur en eau la plus faible (Figure 3c). a) Profil d’électrode d’1m d’espacement. b) Profil d’électrode de 0,5m d’espacement. L’emprise du petit profil dans le grand est représentée par un cadre noir en figure a.

Les valeurs de résistivité après inversion (Figure 4) des deux profils d'espacement 1m et 0,5m témoignent de résistivités basses, entre 10 et 90 ohm.m sur l'ensemble des profils, qui sont révélatrices d'un sol argileux et/ou limoneux. Les valeurs plus importantes jusqu'à 270 ohm.m en surface montrent une couche plus sèche et potentiellement moins argileuse.

Les profils de différence de résistivités apparentes mesurées pour chacune des acquisitions montrent des valeurs négatives, donc une diminution des résistivités, cohérentes avec des teneurs en eau plus élevées dans le sol (Figure 5). Sur les profils d'août et de septembre il y a une légère diminution en surface, jusqu'à -20 ohm.m pour le grand profil, -40 ohm.m pour le petit profil, et des valeurs proche de 0 en profondeur (2^{ème} et 3^{ème} lignes en Figure 5). A ces dates d'acquisitions, les teneurs en eau dans le sol sont proches de celles mesurées pour le profil de référence le 18 octobre (10.8% le 18/08, 9.6% le 18/09 et 9.6% le 18/10 (Figure 3c)). Les profils de différence de résistivité mesurée montrent une présence plus importante d'eau dans le sol sur les 4 premiers mètres le 31 octobre et sur 6 mètres le 17 novembre allant jusqu'à -65 ohm.m de différence sur le profil d'espacement 1m et jusqu'à -120 ohm.m de différence à la surface du profil d'espacement 0,5m (4^{ème} et 5^{ème} lignes en Figure 5). Ces deux profils ont été réalisés durant une période de fortes pluies (Figure 3a), montrant une infiltration cohérente avec les conditions météorologiques.

Le profil de juillet est lui aussi marqué par la présence d'eau jusqu'à 4m de profondeur (1^{ère} ligne en Figure 5). Il s'agit probablement d'eau infiltrée dans sol durant des pluies de printemps. A ce moment, les premiers centimètres de sol sont associés à une teneur en eau de 15.8% d'eau (Figure 3c).

L'ensemble des profils TRE d'espacement 0,5m comportent quelques données avec des différences positives autour de 10 ohm.m, essentiellement localisées en profondeur, à l'aplomb de l'électrode centrale. Cette anomalie positive peut être une erreur négligeable car elle se trouve sur des zones avec des résistivités apparentes autour de 90 ohm.m et représente seulement 10% de différence entre les profils et le profil de référence. Il est possible que cette faible différence de résistivité soit un indice de l'existence d'une zone plus résistive et moins perméable où l'eau s'infiltrer plus difficilement.

Les données de TRE donnent des résultats cohérents avec les pluies et les teneurs en eau du sol. Les augmentations de teneur en eau en surface, qui ont débutées au moment des pluies répétées et parfois intense d'octobre et de novembre, sont associées à des diminutions de la résistivité électrique mesurée du sol. En parallèle, la diminution de l'évapotranspiration et le rapprochement de l'évapotranspiration réelle vers l'évapotranspiration potentielle sont cohérents avec l'augmentation des pluies. Cela montre l'augmentation d'eau disponible dans le sol et la diminution des différentes sources d'énergie pour l'évaporation, comme la chaleur du sol, ou pour l'évapotranspiration, comme le rayonnement net permettant la photosynthèse.

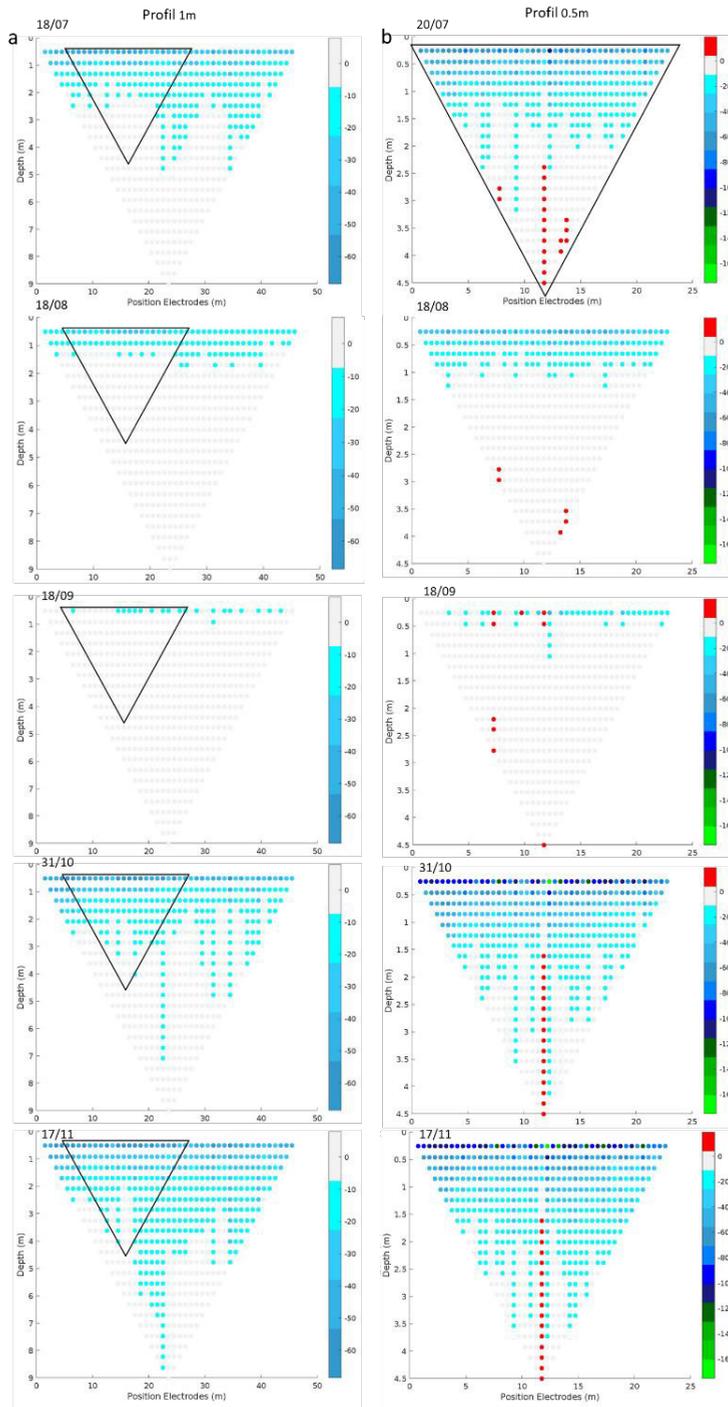


Fig. 5. Ecart des résistivités mesurées avec, comme référence de sol sec, le profil du 18/10/2023. a) Différences sur le profil d'espacement 1m, avec en noir l'emprise du petit profil. b) Différences sur le profil d'espacement 0,5m.

4 Perspectives

Les résultats de tomographie de résistivités électriques montrent une infiltration de l'eau dans le sol du site expérimental qui sont cohérents avec l'occurrence de fortes pluies. Néanmoins, ces résultats sont encore préliminaires et pourront être améliorés. Deux expérimentations de terrain vont être mises en place afin d'améliorer l'interprétation des données.

La première est l'installation de 10 sondes de mesure de la teneur en eau volumique du sol le long du profil électrique, à 3 profondeurs différentes (0,5m, 1,5 et 2m). Elles permettront d'associer des données de teneur en eau mesurées aux variations de résistivité électrique sur les profils en time-lapse. Cela va permettre de corrélérer les variations de résistivité à des valeurs réelles absolues de teneur en eau et d'utiliser ces données dans des modèles hydro-géophysique.

La deuxième est une campagne de prélèvement et de réalisation d'analyse d'échantillons de sol en laboratoire. Lors de l'installation des sondes de teneur en eau, des échantillons de sol seront récupérés pour calibrer les sondes. Des analyses de sol en laboratoire vont également être réalisées pour établir une relation pétrophysique entre les données de résistivité électrique et les propriétés du sol. Ces données, couplées aux données de la station micro-météorologique, vont ensuite permettre la réalisation d'un modèle numérique hydrodynamique adapté au site expérimental. Les échantillons de sol seront également utilisés pour mesurer la conductivité du sol à différentes température et à une teneur en eau donnée. Ces valeurs vont permettre de dessiner la relation linéaire des conductivités électriques normalisées en fonction de la température du sol et d'en extraire la valeur de la pente (notée m en Equation 1) [8]. Cette valeur est indispensable pour corriger les températures des résistivités électriques en time-lapse. Ainsi, les différences de résistivités pourront être recalculées sur les résistivités inversées en time-lapse avec une correction des températures.

A terme, nous allons mettre en place un modèle hydro-géophysique dynamique afin d'étudier l'évolution des quantités d'eau infiltrées dans le sol du SEH, en fonction des paramètres hydrologiques (durée/intensité de pluie, température, évapotranspiration).

Références

- [1] A. Chamroo, R. Ouvrard, T. Poinot, G. Porel, B. Nauleau, Site Expérimental Hydrogéologique de Poitiers : Un champ applicatif pour la modélisation expérimentale, (2013).
- [2] J. Gabilly, E. Cariou, Poitou Vendée Charentes. Masson ed, Guides Géologiques Régionaux. Paris 223, (1997).
- [3] C. Gonnin, E. Cariou, P. Branger, Les facteurs de contrôle de la sédimentation au début du Jurassique moyen sur le seuil du Poitou et ses abords. **315**, 853-859 (1992).
- [4] C. Gonnin, E. Cariou, J.-P. Bassoullet, J. Gabilly, J.-P. Mourier, La stratigraphie séquentielle, outil de datation régional complémentaire de la biostratigraphie : application à la reconstitution de la dynamique sédimentaire des séries bathoniennes de surface du seuil du Poitou (France). **318**, 235-241 (1994).
- [5] L. Blazevic, L. Bodet, S. Pasquet, N. Linde, D. Jougnot, L. Longuevergne, Time-Lapse Seismic and Electrical Monitoring of the Vadose Zone during a Controlled Infiltration Experiment at the Ploemeur Hydrological Observatory, France, *Water*. **12**, 1230, doi:10.3390/w12051230 (2020).

- [6] A.M. Binley, S. Henry-Poulter, B. Shaw, Examination of solute transport in an undisturbed soil column using electrical resistance tomography, *Water Resources Research*. **32**, 763-769 (1996).
- [7] M. Descloitres, O. Ribolzi, Y.L. Troquer, J.P. Thiébaux, Study of water tension differences in heterogeneous sandy soils using surface ERT, *Journal of Applied Geophysics*. **64**, 83-98, doi:10.1016/j.jappgeo.2007.12.007 (2008).
- [8] K. Hayley, L.R. Bentley, M. Gharibi, M. Nightingale, Low temperature dependence of electrical resistivity: Implications for near surface geophysical monitoring, *Geophysical Research Letters*. **34**, doi:10.1029/2007GL031124 (2007).
- [9] A. Watlet, O. Kaufmann, A. Triantafyllou, A. Poulain, J.E. Chambers, P.I. Meldrum, P.B. Wilkinson, V. Hallet, Y. Quinif, M. Van Ruymbeke, M. Van Camp, Imaging groundwater infiltration dynamics in the karst vadose zone with long-term ERT monitoring, *Hydrology and Earth System Sciences*. **22** 1563-1592, doi:10.5194/hess-22-1563-2018 (2018).
- [10] H.L. Penman, Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. **193** 120-145, doi:10.1098/rspa.1948.0037 (1948).
- [11] I. Hajji, D.F. Nadeau, B. Music, F. Anctil, J. Wang, Application of the Maximum Entropy Production Model of Evapotranspiration over Partially Vegetated Water-Limited Land Surfaces, *Journal of Hydrometeorology*. **19**, doi:10.1175/JHM-D-17-0133.1 (2018).
- [12] M. Alves, B. Music, D.F. Nadeau, F. Anctil, Comparing the Performance of the Maximum Entropy Production Model With a Land Surface Scheme in Simulating Surface Energy Fluxes, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. **124** 3279-3300, doi:10.1029/2018JD029282 (2019).