



**HAL**  
open science

## Caractérisation géophysique multi-méthodes et multi-échelles de la ZNS des calcaires hétérogènes de Beauce

Clémence Ryckebusch, Jean-Michel Baltassat, Jacques Deparis, Pauline Kessouri, Anatoly Legchenko, Nadia Amraoui, Mohamad Abbas, Mohamed Azaroual

### ► To cite this version:

Clémence Ryckebusch, Jean-Michel Baltassat, Jacques Deparis, Pauline Kessouri, Anatoly Legchenko, et al.. Caractérisation géophysique multi-méthodes et multi-échelles de la ZNS des calcaires hétérogènes de Beauce. 13ème colloque GEOFCAN - Géophysique des sols et des formations superficielles, Nov 2023, Strasbourg (67000), France. hal-04204866

**HAL Id: hal-04204866**

**<https://brgm.hal.science/hal-04204866v1>**

Submitted on 12 Sep 2023

**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.

## CARACTERISATION GEOPHYSIQUE MULTI-METHODES ET MULTI-ECHELLES DE LA ZNS DES CALCAIRES HETEROGENES DE BEAUCE

RYCKEBUSCH C.<sup>1,2</sup>, BALTASSAT J-M.<sup>1</sup>, DEPARIS J., KESSOURI P.<sup>1</sup>, LEGCHENKO A.<sup>3</sup>, AMRAOUI N.<sup>1</sup>, ABBAS M.<sup>2</sup>, AZAROUAL M.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>BRGM, 45100 Orléans, France. (c.ryckebusch@brgm.fr)

<sup>2</sup>Université d'Orléans, CNRS, BRGM, ISTO, UMR 7327, F-45071, Orléans, France

<sup>3</sup>Université Grenoble Alpes, IRD, IGE, Grenoble, France

### RESUME

*L'enjeu sur la compréhension du cycle d'eau nécessite une connaissance fine de la dynamique dans la zone non saturée (ZNS) et particulièrement la ZNS profonde. L'interprétation jointe des résultats électriques et RMP et des données de forage dans les calcaires hétérogènes altérés de Beauce permet de distinguer une variabilité spatiale à l'échelle décimétrique avec deux zones du milieu aux propriétés lithologiques et hydrogéologiques différentes : un calcaire fracturé karstifié supposant des écoulements rapides et un calcaire fracturé très altéré argileux supposant une barrière sans écoulements.*

**Mots clés:** zone non saturée, RMP, calcaires de Beauce, résistivité électrique, chargeabilité

### ABSTRACT

*The water cycle issue needs a relevant knowledge of the vadose zone dynamics and particularly of the deep vadose zone. The joint interpretation of SNMR and electrical results with log data in the Beauce heterogeneous weathered limestone allows distinguishing a spatial variability at decametric scale with two areas with variable lithological and hydrogeological properties: a karstified fractured limestone, which assumes fast flows and a highly clayey weathered fractured limestone, which assumes a barrier without flows.*

**Key words:** vadose zone, SNMR, Beauce limestone, electrical resistivity, chargeability

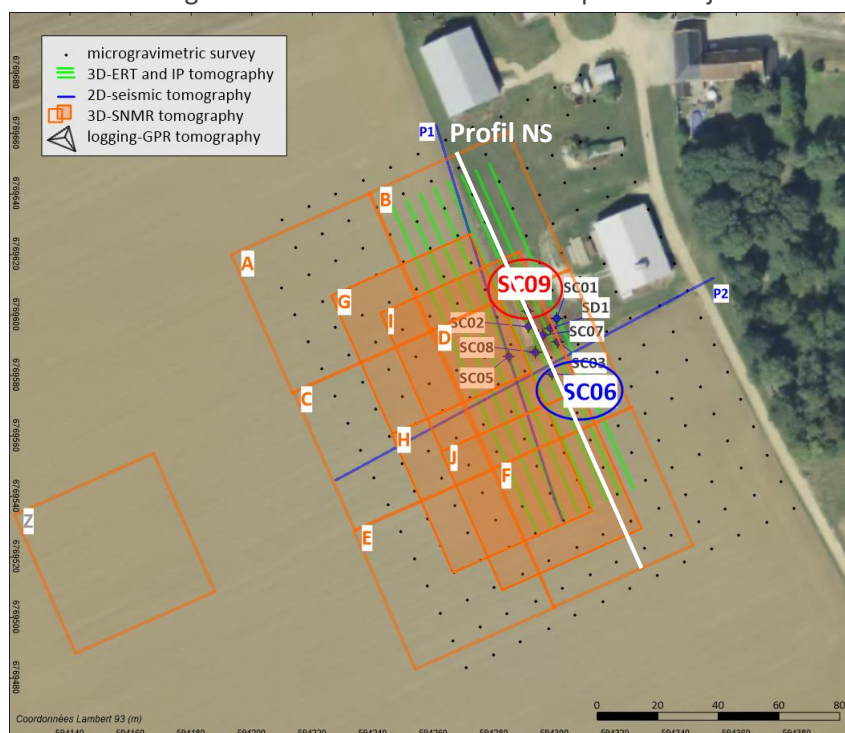
## 1. INTRODUCTION

La compréhension du cycle de l'eau est un enjeu majeur pour la préservation des nappes. Dans un contexte de dérèglement climatique, la pollution de l'eau notamment par les engrais utilisés pour l'agriculture, amènent à une situation environnementale critique. Il est donc nécessaire d'avoir une connaissance fine des processus d'écoulements et échanges hydriques entre le sol et la nappe dans la zone non saturée (ZNS). La ZNS très proche surface est bien étudiée avec une instrumentation adaptée de même que les propriétés hydrogéologiques de l'aquifère sont bien déterminées avec des relevés piézométriques et des tests de pompage. Les méthodes géophysiques de sub-surface permettent de délimiter la géométrie de l'aquifère et ses propriétés physiques, par exemple électriques avec les méthodes ERT et IP. La résonance magnétique protonique (RMP) est une méthode directe de mesure de la teneur en eau et permet d'accéder aux propriétés aquifères en complément de sa géométrie [Legchenko, 2013 ; Binley et al., 2015].

## 2. CONTEXTE, MATERIELS ET METHODES

Le site d'étude se situe à Villamblain dans la région Centre Val de Loire, l'une des plus cultivée et polluée aux nitrates de France. La géologie complexe du site peut être subdivisée en quatre unités soit de haut en bas : (1) une couche de sol argileux et calcaire très hétérogène et altéré de 0 à 6-8 m, (2) un calcaire altéré, fracturé et karstifié de 6-8 à 25 m, (3) des marnes plus ou moins argileuses de 25 à 30 m, (4) un calcaire fracturé au-delà. De 1966 à 2020, le niveau piézométrique moyen est à -18.40 m. Le site a été choisi pour construire un observatoire de la zone non saturée (<https://plateformes-pivots.eu/o-zns/>).

Cela consiste en un puits instrumenté de 4 m de diamètre et 20 m de profondeur, entouré de 9 forages, dans le but d'étudier la zone non saturée profonde de l'aquifère de Beauce. Des investigations par sondages carottés, diagraphies et géophysique en surface et en forage ont été réalisées avant le creusement du site, pour caractériser le site. Aldana et al., (2021) montre (1) que l'altération des calcaires se traduit par un remplacement de la matrice calcaire par des matériaux argileux et par une oxydation des fractures, (2) une hétérogénéité des propriétés hydrauliques sur les échantillons de roche calcaire. Les campagnes géophysiques menées en 2018 et en 2019 : (1) mettent en évidence une structure du massif calcaire globalement tabulaire correspondant à la succession lithologique décrite par Aldana et al., (2021), (2) identifient localement une lentille argileuse (e.g. Jodry et al., 2018 ; Mallet et al., 2022). En 2020, une troisième campagne d'acquisitions simultanées de données géophysiques multi-méthodes (RMP 3D, ERT/IP 3D, sismique, géoradar, micro-gravimétrie) et de diagraphies en forage (densité, RMN, résistivité électrique) [Figure 1] a été menée par le BRGM et l'ISTO afin (1) de préciser les hétérogénéités spatiales du site en 3D, (2) d'apporter une information supplémentaire avec un modèle de teneur en eau RMP 3D sur l'hydrogéologie du site à l'échelle terrain. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette étude dont l'objectif est d'interpréter conjointement les réponses RMP et électriques en 3D avec les données de forage pour distinguer les hétérogénéités spatiales en terme de contrastes lithologiques et hydrogéologiques. Les acquisitions 3D ont été réalisées suivant 10 sondages RMP en configuration de boucle carrée de 50 m de côté, et 8 profils électriques de 48 électrodes écartées de 2.5 m en configuration dipôle-dipôle. Les données RMP et électriques sont inversées en 3D respectivement avec les logiciels SAMOVAR et BERT et interprétés conjointement.

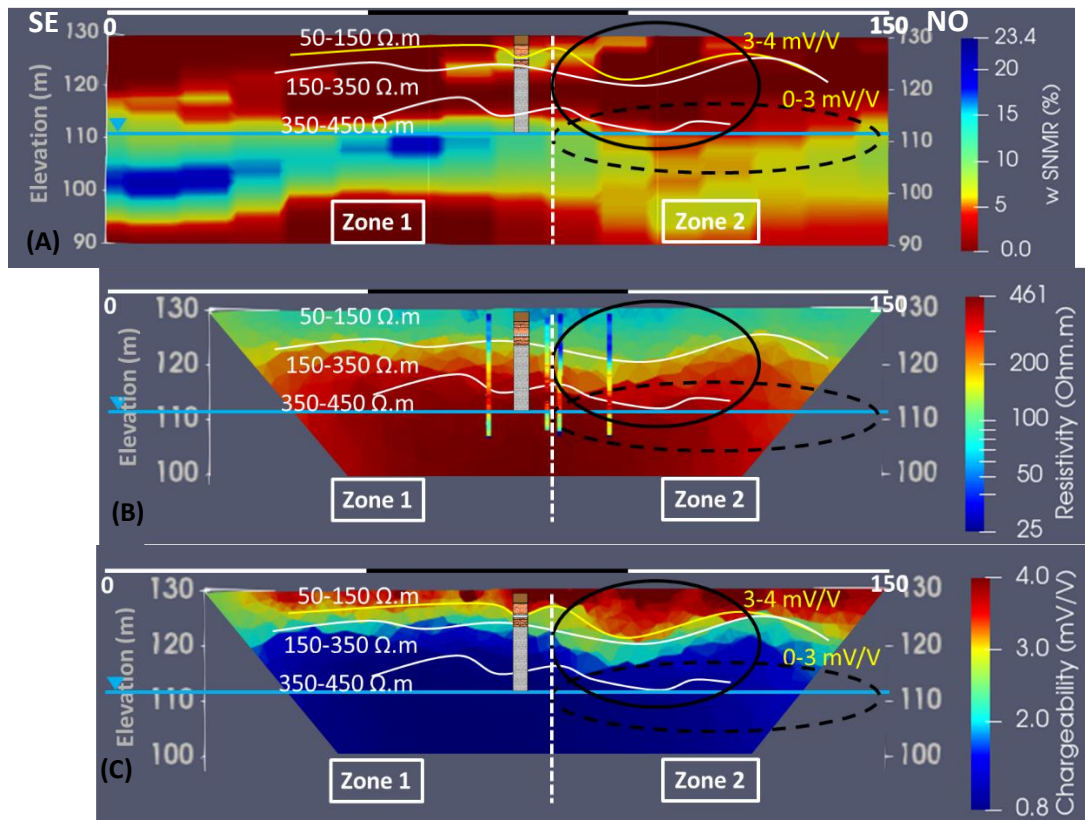


**Fig. 1 - Localisation des forages et des données géophysiques multi-méthodes acquises sur le site lors de la campagne de 2020.**

### 3. RESULTATS ET DISCUSSION

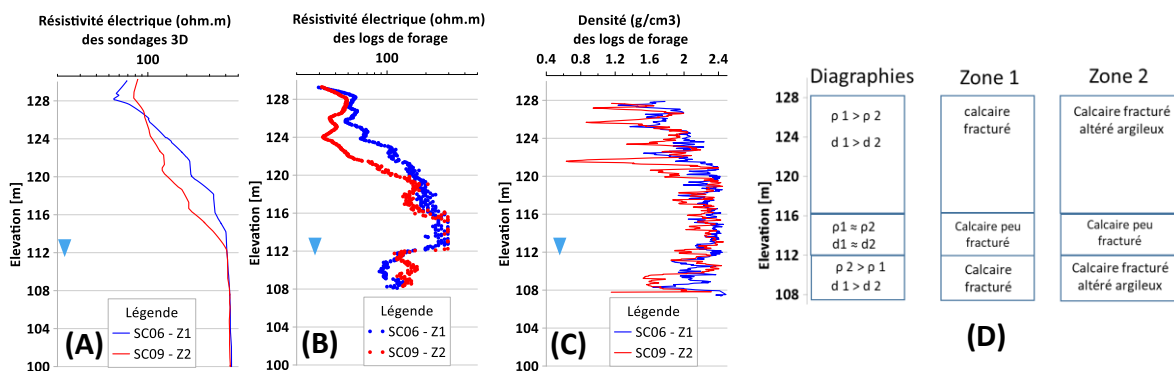
L'interprétation jointe est faite selon le profil NS [Figure 1] passant à la fois par les modèles 3D de teneur en eau RMP, de résistivité électrique/chargeabilité et 4 forages. Dans l'aquifère, l'interprétation des mesures RMP du profil NS [Figure 2] permet de distinguer deux zones aux réponses de teneur en eau contrastées : la zone 1 avec une forte teneur en eau RMP dans l'aquifère et quelques mètres au-dessus correspondant à une porosité plus élevée due à une fracturation/karstification du calcaire. La zone 2 avec une faible teneur en eau RMP correspondant à une porosité faible, probablement due à une moindre fracturation ou une augmentation de la teneur en argile.

Dans la zone non saturée (0-20 m), la réponse électrique concorde avec celle obtenues dans les études précédentes (e.g. Mallet et al., 2022) et permet de retrouver l'anomalie conductrice et hautement chargeable interprétée comme argileuse. Cependant, à ce stade, les mesures électriques ciblées à la zone non saturée et les mesures RMP donnant une information sur la zone saturée, ne permettent pas de les comparer directement.



**Fig. 2** – Profils NS de (A) teneur en eau RMP, (B) résistivité électrique, (C) chargeabilité, interprétés avec la zone 1 et la zone 2 présentant une anomalie RMP (cercle noir trait pointillé) et une anomalie électrique (cercle noir trait plein).

L'analyse détaillée des données de forage nous permet-elle de préciser ce modèle ? La Figure 3 présente les logs des sondages SC06 et SC09 situés respectivement en zone 1 et 2 [Figure 1] avec la densité et résistivité en forage, la résistivité extraite du modèle 3D et un modèle synthétique des données de forage.



**Fig 3** – Logs SC06 (zone 1) et SC09 (zone 2) : de résistivité électrique (A) extrait du modèle 3D, (B) en forage ; (C) densité en forage ; (D) Modèle synthétique des informations issues des forages pour les zones 1 et 2 avec  $p$  la résistivité et  $d$  la densité.

D'après la Figure 3, le sondage SC06 (zone 1) est plus dense et a une résistivité plus élevée que le sondage SC09 (zone 2) jusque 116 m à l'échelle terrain et forage, ce qui est cohérent avec l'hypothèse d'un calcaire fracturé peu altéré en zone 1 et un calcaire fracturé, très altéré argileux en zone 2. De 116 m à 112 m, les densités et résistivités de SC06 et SC09 sont équivalentes, l'hypothèse retenue est celle d'un changement de lithologie avec pour les deux sondages un calcaire peu fracturé. De 112 m à 108 m, résistivité et densité de SC09 sont proches de celles observées au-dessus de 116 m, l'hypothèse retenue est celle d'un retour à la lithologie précédente : calcaire fracturé, très altéré argileux. Pour SC06, la densité est équivalente aux précédentes avec une forte baisse de la résistivité. L'hypothèse retenue est que la saturation sous nappe fait baisser significativement la résistivité de ce milieu fracturé, peu altéré. Que cette baisse ne soit pas visible dans le modèle 3D, s'explique par le défaut de résolution en profondeur (effet d'échelle entre les résistivités par diagraphies et en tomographie 3D). En revanche la teneur en eau plus élevée dans la zone 1 saturée est bien sensible dans le modèle 3D de teneur en eau RMP. Ce modèle est discuté sur la base de la loi d'Archie déterminée sur le même site par Abbas et al., (2022) ainsi que par modélisation directe visant à tester la résolution des méthodes géophysiques de surface.

## CONCLUSIONS

L'interprétation conjointe des résultats électriques et RMP et des données de forage a mis en évidence la variabilité latérale lithologique et hydrique à l'échelle décimétrique (deux zones distinguées) avec une homogénéité lithologique verticale (nappe et ZNS) pour chaque zone. Des mesures locales en forages (ERT) montrent une bonne correspondance entre des mesures à une grande échelle (ERT) et des mesures locales (logs électriques en forages). Ces réponses peuvent supposer des dynamiques d'écoulement dans la ZNS variables pour les deux zones : des écoulements plus rapides dans la première due à une forte karstification dans l'aquifère et des écoulements plus lents, voire une barrière et une possibilité de nappe perchée dans la seconde due à la présence d'argile dans la ZNS et l'aquifère. L'étude a mis en évidence des effets d'échelles et la complémentarité des données de résistivité électrique et de teneur en eau RMP pour l'interprétation ; elle montre l'intérêt d'acquérir un jeu de données à la fois multi-méthode et multi-échelle pour appréhender la complexité du milieu.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABBAS M., DEPARIS J., ISCH A., MALLET C., JODRY C., AZAROUAL M., ABBAR B., BALTASSAT J. M., 2022** - Hydrogeophysical characterization and determination of petrophysical parameters by integrating geophysical and hydrogeological data at the limestone vadose zone of the Beauce aquifer. *Journal of Hydrology*, 615, 128725.
- ALDANA C., ISCH A., BRUAND A., AZAROUAL M., COQUET Y., 2021** - Relationship between hydraulic properties and material features in a heterogeneous vadose zone of a vulnerable limestone aquifer. *Vadose zone journal*, 20 (4), e20127.
- BINLEY A., HUBBARD S.S., HUISMAN J.A., REVIL A., ROBINSON D.A., SINGHA K., SLATER, L.D., 2015** - The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales. *Water Resources Research*, 51 (6), 3837–3866.
- JODRY C., ISCH A., ALDANA C., AZAROUAL M., KLINTZING M., 2018** - Caractérisation géoélectrique de la zone non saturée d'un site d'observation de la nappe de Beauce à Villamblain. *GEOFCAN 2018, Antony (France)*.
- LEGCHENKO A., 2013** - Magnetic Resonance Imaging for Groundwater. *John Wiley & Sons, ISBN 978-1-118-64947-3*.
- MALLET C., ISCH A., LAURENT G., JODRY C., AZAROUAL M., 2022** - Integrated static and dynamic geophysical and geomechanical data for characterization of transport properties. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 153, 105050.