

UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

Ecole doctorale :
Energie, Matériaux, Sciences de la Terre et de l'Univers
Laboratoires : ISTO - BRGM

THÈSE présentée par : **Clémence RYCKEBUSCH**

soutenue le : **5 décembre 2024**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université d'Orléans**
Discipline/ Spécialité : Sciences de l'Univers / Hydro-géophysique

**Apport de la tomographie par Résonance
Magnétique des Protons pour améliorer la prise
en compte du changement d'échelle et des
hétérogénéités dans les modèles des transferts
hydriques dans la zone non saturée**

THÈSE dirigée par :
AZAROUAL Mohamed
LEGTCHENKO Anatoli

Docteur, ISTO, BRGM, CNRS, Université d'Orléans
Directeur de Recherche, IRD, Marseille

RAPPORTEURS :
GIRARD Jean-François
CHALIKAKIS Konstantinos

Professeur, Université de Strasbourg
Professeur, Université d'Avignon

JURY :
DORFLIGER Nathalie
CHEN Yan
DUWIG Céline
KESSOURI Pauline

Docteur, Danone, Présidente du jury
Professeur, Université d'Orléans
Directrice de Recherche, IRD, Grenoble
Docteur, BRGM

INVITE :
BALTASSAT Jean-Michel

Ingénieur, BRGM

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier mes directeurs de thèse Mohamed AZAROUAL et Anatoly LEGCHENKO pour leur expertise, leurs conseils, leur vision et pour m'avoir aidé à élargir et prendre du recul sur mon travail tout au long de la thèse.

Je remercie également les rapporteurs Jean-François GIRARD et Konstantinos CHALIKAKIS et les autres membres du jury Nathalie DORFLIGER, Céline DUWIG et Yan CHEN d'avoir accepté de relire et d'évaluer ce travail.

Je remercie mes co-encadrants au BRGM : Nadia AMRAOUI pour son expertise en hydrogéologie, tes conseils m'ont permis de toujours garder le contexte, le cadre et la perspective hydrogéologique des résultats. Jean-Michel BALTASSAT et Pauline KESSOURI qui m'ont encadrée au quotidien, avec beaucoup d'engagement, à toutes les étapes de la thèse, dans les bons moments et dans la difficulté. Jean-Michel m'a fait découvrir la méthode RMP dès mon stage de fin d'études au BRGM et m'a formée à la méthode tout au long de la thèse. J'ai encore beaucoup à apprendre de cette méthode mais je commence, je crois, à en maîtriser quelques ficelles. Pauline, qui m'a encadrée lors de mon stage de fin d'études et de cette thèse. J'ai pu compter sur elle à tout moment et sur tous les sujets, qu'ils soient liés ou non à la thèse. Merci d'avoir été là et de m'avoir soutenue dans cette aventure, qui se clôturera de la plus belle des manières à la soutenance.

Je remercie mes collègues de l'ISTO qui travaillent ou ont travaillé sur le projet OZNS : Bouamama ABBAR, Céline MALLET, Gautier LAURENT, Abdoul NASSER YACOUBA, Mohamad ABBAS. Les discussions sur les travaux dans des disciplines variées m'ont permis d'élargir les interprétations des résultats à un contexte élargi. Bouamama et Mohamad qui m'ont accompagnée lors de nombreuses missions sur le site OZNS. Également les doctorants, ingénieurs et post-doctorants de l'ISTO : Flore, Noura, Amélie, Nathan, Juliette, Léo, entre autres, pour les bons moments passés et le partage d'expérience.

Je remercie les collègues hydrogéologues au BRGM : Pascal AUDIGANE, Jean-Charles MANCEAU et Etienne BUSCARLET qui m'ont aidée de près ou de loin sur le volet hydrogéologique pendant la première année de thèse. Ainsi que les doctorants et post-doctorants : Elena, Lucas, Luca, Adrien, Ryma, entre autres, pour les bons moments. Elena merci également pour ton soutien de tout instant, entre alumni Polytech, on se connaît et on sait les choses.

Enfin, je remercie chaleureusement toute l'équipe étendue des géophysiciens de DRP/IGT y compris mes collègues de bureau Simon et Bitnarae, les doctorants Urie, Abbas, et Sabrina et Farid dans l'unité SPU. Merci d'avoir su créer un environnement de travail de confiance où je me suis sentie à l'aise dès mon arrivée il y a presque 4 ans maintenant. Merci de m'avoir soutenue, conseillée, supportée quand j'étais fatiguée, que j'avais faim et que je râlais pour un rien, accompagnée dans les difficultés et de m'avoir partagée votre expérience. J'ai beaucoup appris à vos côtés et j'en ressors grandie à tout point de vue.

Je tiens aussi à remercier Roger GUERIN qui a été ma porte d'entrée vers le monde de la géophysique et m'a accompagnée dans les différentes étapes de mon parcours. J'ai découvert cette discipline lors de mes cours à Polytech, il m'a conseillée dans mes choix de stages et dans mon choix de poursuivre en thèse par la suite, a été l'encadrant académique de mon SFE et était dans mon jury de mi-thèse. Merci !

Dans les remerciements plus personnels, d'abord je remercie tous les danseuses et danseurs de Swingchap' Orléans. J'ai découvert et appris la danse swing en même temps que ma thèse. Cela m'a apporté un équilibre qui m'a permis d'être efficace dans les deux volets. Ces expériences m'ont fait grandir, j'ai appris à me connaître un peu mieux et à gagner en confiance en moi.

Et enfin je remercie mes amis et ma famille : mes parents, mon frère et ma grand-mère, qui m'ont apporté un soutien inconditionnel, essentiellement à distance, et ont toujours été présents pour moi. Je leur dédie ce travail.

Table des matières

Liste des figures	7
Liste des tableaux	14
Introduction générale.....	15
Partie 1 : Contexte de l'étude et description du site de Villamblain	18
Chapitre 1.1 : L'Aquifère de Beauce et le site de Villamblain.....	18
1.1.1 Présentation générale de l'Aquifère de Beauce	18
1.1.2 Site de Villamblain et contexte hydrométéorologique.....	22
Chapitre 1.2 : Données existantes sur le site de Villamblain	26
1.2.1 Caractérisation lithologique et géophysique du site O-ZNS : études précédentes ..	26
1.2.2 Suivi dynamique de la ZNS sur le site Grand Bois : synthèse des études précédentes	31
1.2.3 Estimation des temps de transferts dans les calcaires de Beauce avec la géophysique et la modélisation hydrogéologique	33
Chapitre 1.3 : Synthèse	35
Partie 2 : Rappels théoriques et état de l'art.....	37
Chapitre 2.1 : Hydrogéologie en zone non saturée.....	37
2.1.1 Ecoulements saturés et non saturés.....	37
2.1.2 Simulation numérique des écoulements non saturés.....	39
Chapitre 2.2 : Méthodes géophysiques	40
2.2.1 Méthodes basées sur le phénomène NMR	40
2.2.2 Les méthodes électriques	49
Partie 3 Caractérisation hydro-géophysique des hétérogénéités lithologiques et de teneur en eau sur le site OZNS.....	52
Chapitre 3.1 : Introduction et jeu de données	52
3.1.1 Introduction	52
3.1.2 Jeu de données mesuré sur le site OZNS	52
Chapitre 3.2 : Données SNMR	54
3.2.1 Acquisition et filtrage des données	54
3.2.2 Inversion et résultats	59
3.2.3 Nouvelle boucle SNMR décimétrique	66
Chapitre 3.3 : Données BNMR.....	70
3.3.1 Acquisition et traitement des données	70
3.3.2 Résultats et teneur en eau BNMR.....	71

Chapitre 3.4 : Données électriques	73
3.4.1 Modèle 3D ERT/IP	73
3.4.2 Données BER et densité en forage.....	75
Chapitre 3.5 : Comparaison des résultats géophysiques et inter-corrélations	77
3.5.1 Echelle décamétrique	77
3.5.2 Echelle décimétrique (forage)	80
3.5.3 Multi-échelle	82
Chapitre 3.6 : Discussion.....	88
3.6.1 Modèle lithologique du site OZNS tenant compte des hétérogénéités	88
3.6.2 Modèle de teneur en eau	89
3.6.3 Evolution dynamique du modèle de teneur en eau	90
3.6.4 Applicabilité des modèles lithologique et de teneur en eau OZNS au site GB	90
Chapitre 3.7 : Synthèse	95
Partie 4 : Suivi temporel du stock d'eau dans la ZNS sur le site GB.....	97
Chapitre 4.1 : Introduction et contexte hydrométéorologique.....	97
4.1.1 Introduction.....	97
4.1.2 Lamme d'eau infiltrée : calcul de la pluie efficace	97
4.1.3 Calcul de la hauteur d'eau SNMR	100
Chapitre 4.2 : Monitoring de teneur en eau SNMR 2022-2024	101
4.2.1 Acquisition et filtrage des données	101
4.2.2 Inversion et résultats	109
4.2.3 Discussion : condition de suivi time-lapse de la ZNS avec la SNMR.....	114
Chapitre 4.3 : Synthèse	116
Conclusion générale	117
Références	119
Annexe 1 : Résumé de l'oral présenté à la conférence internationale EGU 2023	123
Annexe 2 : Résumé étendu présenté à la conférence française GEOFCAN 2023.....	124
Annexe 3 : Publication soumise au journal <i>Near Surface Geophysics</i>	129

Liste des figures

Figure 1.1 : Emprise de l’aquifère de Beauce par rapport aux bassins versants de la Seine et de la Loire, le réseau hydrographique de surface et l’altimétrie. Sont également situés Villamblain (site d’étude), Poiseaux (données piézométriques), Bricy (données météorologiques) et Orléans.	18
Figure 1.2 : Vue 3D de la géologie à l’affleurement pour l’ensemble des formations du système aquifère de Beauce. Villamblain est pointé pour faciliter sa localisation dans la géologie de l’aquifère. Figure modifiée de (Martin et al., 1999).	19
Figure 1.3: Précipitations annuelles moyennes (mm) entre 1981 et 2010 en France et position de l’Aquifère de Beauce (Modifié de https://www.eaufrance.fr/les-volumes-de-precipitations).	20
Figure 1.4: Evolution des prélèvements en eau en m3 dans la nappe entre 2000 et 2005 (SAGE, 2013a).	20
Figure 1.5: Carte de vulnérabilité de la nappe de Beauce dans le périmètre du SAGE Nappe de Beauce (SAGE, 2013a).	21
Figure 1.6 : Concentrations moyennes en nitrate dans les nappes phréatiques en France. (Figure modifiée de (Commisariat général au développement durable, 2013)).	22
Figure 1.7: Localisation des sites d’étude Grand Bois et O-ZNS à Villamblain et des forages BSS à proximité des deux sites.	23
Figure 1.8 : Lithologie du site de Villamblain décrite à partir des forages situés à proximité des sites Grand Bois et O-ZNS. La lithologie simplifiée décrit les grands ensembles communs à tous les forages.	24
Figure 1.9: Pluviométrie (en bleu) et Evapotranspiration Potentielle (ETP) annuelle (en rouge) de 1966 à 2024.	25
Figure 1.10: Variations du niveau piézométrique d’octobre 1965 à août 2024 sur le site OZNS. La chronique complète est reconstituée à partir de deux séries : le niveau piézométrique mesuré à Poiseaux jusqu’en août 2021 puis à OZNS à partir de mars 2021. Le calage a été fait sur la période commune entre mars et août 2021. Les traits rouges représentent les périodes hautes et basses du niveau piézométrique.	25
Figure 1.11: Localisation des données géophysiques acquises en 2018 et 2019 et de l’ensemble des forages sur le site O-ZNS.	26
Figure 1.12: Description lithologique des sondages SC01-SC03 faite par (Aldana, 2019) et réinterprétée en catégories d’altération.	28

Figure 1.13: Observation sur lame mince et analyse chimique d'une micro-fissure (haut) et d'un micro-fossile (bas) sur des échantillons de roches prélevés dans le sondage SC02 à 11.7 m et 11m de profondeur (Aldana, 2019).	29
Figure 1.14: Profils ERT de 2018 sur le site O-ZNS couplés à la lithologie de forage. Modifié de (Jodry et al., 2018).	30
Figure 1.15: (A) Cartographie ERI de 2019 à 2 m de profondeur, (B) Profils ERT de 2019 correspondant à la carte ERI, (C) Profil ERT et PP correspondants à la carte ERI, (D) lithologie, permittivité diélectrique, amplitude GPR et résistivité électrique de forage (Abbas et al., 2021; Céline Mallet et al., 2022).	30
Figure 1.16: (A) Profils sismiques S1 et S2 de 2018, (B) corrélation avec la lithologie de forage (Céline Mallet et al., 2022).	31
Figure 1.17: Teneur en eau SNMR (échelle de couleur) issue de l'inversion time-lapse des sondages SNMR lors des monitorings de (A) 1999-2000, (B) 2020-2021 jusqu'à une profondeur de 22 m. Suivi de la pluie journalière sur la même période pour (C) 1999-2000 et (D) 2020-2021. (Legchenko et al., 2022).	32
Figure 1.18: Variation temporelle de la colonne d'eau SNMR (rouge), la pluie cumulée (noir) et du niveau piézométrique (bleu) sur le site Grand Bois en 1999-2000 (Legchenko et al., 2022).	33
Figure 2.1 : Modèle conceptuel de porosité modifié du modèle défini par (Lubczynski and Roy, 2005) dans l'aquifère et la zone non saturée.	38
Figure 2.2 : Séquences de mesures NMR : (A) FID et (B) CPMG. Extrait de (Behroozmand et al., 2015).	42
Figure 2.3 : Données BNMR : distribution de constantes de temps de relaxation T_2 et des teneurs en eau partielles associées. Deux temps de coupures à 3 ms et à 100 ms dans la séquence permettent de décomposer la teneur en eau totale en trois composantes en fonction de la taille des pores : la « clay water », la « bound water » et la « moveable water ».	43
Figure 2.4 : Séquence de mesure utilisée pour mesurer T_1 (modifié de (Legtchenko, 2013)).	44
Figure 2.5 : Configuration générale des électrodes lors d'une mesure de résistivité électrique (Reynolds, 2011)	49
Figure 2.6 : Configurations d'électrodes communément utilisées en ERT (Singha et al., 2022)	50
Figure 3.1 Localisation des dispositifs de mesures géophysiques et des 9 forages (SC01 à SC09) sur le site OZNS lors de la campagne d'acquisition de 2020.	53
Figure 3.2 : Positionnement relatif des boucles SNMR lors de l'acquisition des sondages.	55

Figure 3.3 : Courbe (A) des amplitudes moyennes, (B) du temps de relaxation T_1 , (C) du temps de relaxation T_2^* , en fonction du pulse pour le sondage A. Les points encadrés en vert avec le maximum d'amplitude et l'écart le plus important entre FID1 et FID2 correspondent aux points retenus pour estimer T_1 et T_2^* pour ce sondage.....	57
Figure 3.4 : Sondages SNMR en amplitude E_0 et bruit.....	58
Figure 3.5 : Amplitude du signal provenant d'une couche d'eau libre en fonction de profondeur de cette couche. Le croisement de cette courbe avec le niveau de bruit moyen (ligne bleue) donne la valeur du DOI max.	59
Figure 3.6 : (A) Disposition des boucles dans le modèle d'inversion 3D, (B) Recoupement des boucles et zone de bonne couverture (rectangle en pointillé blanc).....	60
Figure 3.7 : (A) Résultat du fit des sondages dans le modèle 3D pour la solution retenue avec une erreur RMSE = 16.19 nV. (B) RMSE spatialisé de chaque sondage, (C) Erreur comprise entre 10 et 20 nV. (D) Résultat de l'inversion 3D	61
Figure 3.8 : Sections horizontales extraites du modèle 3D de teneur en eau SNMR à 120 m d'élévation dans la ZNS (gauche) et à 110 m d'élévation dans la zone saturée (droite). Les points blancs représentent la position des forages. Les rectangles gris délimitent les zones Z1 et Z2 interprétées. La ligne blanche représente la trace du profil NS dont la section verticale sera interprétée par la suite.	62
Figure 3.9 : Section verticale extraite du modèle 3D de teneur en eau SNMR à la position du profil NS passant par les zones Z1, Z2 et par des forages (Figure 3.8). La ligne bleue représente le niveau piézométrique, les flèches grises délimitent les zones Z1 et Z2 définies précédemment.	63
Figure 3.10 : Relation expérimentale entre la constante de temps de relaxation T_2^* et la teneur en eau SNMR pour différents milieux (modifié de Vouillamoz 2003). Les points OZNS sont les symboles jaunes avec les étiquettes noires.	64
Figure 3.11 : (A) Section horizontale de teneur en eau SNMR extraite du modèle 3D à 110 m (zone saturée). Les points blancs représentent la position des forages. Les rectangles gris délimitent les zones Z1 et Z2 interprétées. (B) Carte de la distribution spatiale des constantes de temps de relaxation T_2^* , calculée à partir des valeurs de T_2^* sur les sondages 1D.	65
Figure 3.12 : Schéma explicatif de la boucle. RMP = SNMR. (Rapport BRGM RP-71648-FR)	66
Figure 3.13 : Photos de : (A) la boucle SNMR à gauche et les longueurs remontant en surface, (B) le blindage de la boucle, (C) le blindage du câble remontant. (Rapport BRGM RP-71648-FR).....	67
Figure 3.14 : Dispositif final intégrant la boucle SNMR, le capteur de température et l'isolant thermique, le tout placé dans une boîte en PVC. (Rapport BRGM RP-71648-FR).....	67

Figure 3.15 : Boucle SNMR dans la boîte PVC (A) côté ZNS avec la sonde température (cercle rouge) et (B) installée dans le puit avec une ouverture côté claveaux ouvertes pour permettre le remplissage par le fillaire. (Rapport BRGM RP-71648-FR) 68

Figure 3.16 : Plan du site expérimental d'O-ZNS et position de la boucle par rapport au site. (Rapport BRGM RP-71648-FR) 69

Figure 3.17 : Distributions des teneur en eau BNMR pour les sondages SC05-6-7-8 mesurés avec la sonde de 60 mm (A-D) et pour les sondages SC08-9 mesurés avec la sonde de 90 mm (E-F). Les plages en rouge représentent les profondeurs pour lesquelles les mesures sont trop bruitées ou de mauvaise qualité et donc non interprétables (rapport d'acquisition BRGM RP-72842-FR). 71

Figure 3.18 : Logs SC05-6-7-8 des distributions de teneur en eau BNMR (A-D), les logs SC05-6-7-8 de teneurs en eau totales BNMR (E) et de T_{2ML} (F). Les données ont toutes été mesurées avec la sonde à 60 mm. La ligne bleu est le niveau piézométrique. 72

Figure 3.19 : Sections horizontales du modèle 3D de résistivité électrique (gauche) et de chargeabilité (droit) dans la ZNS à 120 m (haut) et dans la zone saturée à 110 m (bas). Les points blancs indiquent la position des forages. Les rectangles gris représentent les zones 1 et 2. Le trait blanc représente la trace de la section verticale interprétée par la suite. Extrait de Ryckebusch et al., (2024). 74

Figure 3.20 : Section verticale de résistivité électrique (haut) avec les logs BER (de gauche à droite : SC06-SC05-SC07-SC09) et de chargeabilité (bas), extraits du modèle 3D électrique. La ligne bleue est le niveau piézométrique. Les lignes blanches sont les iso-lignes de résistivité électriques à 150 $\Omega.m$ et 350 $\Omega.m$ et la ligne blanche en tiret est l'iso-ligne de chargeabilité à 3 mV/V. Extrait de Ryckebusch et al., (2024). 75

Figure 3.21 : (A) Logs BER des forages SC05-6-7-8-9. Les résistivités électriques supérieures à 300 $\Omega.m$ sont en dehors de la gamme de sensibilité de la sonde et ne sont pas présentées. (B) Logs de densité des forages SC05-6-7-8-9. Les lignes traits tiret noires représentent les limites de couches interprétées et la ligne bleue représente le niveau piézométrique. 76

Figure 3.22 : Ré-échantillonnage (A) du modèle 3D de teneur en eau SNMR (points noirs) et du modèle 3D ERT/IP (cellules bleues) en (B) un modèle 3D à trois paramètres : teneur en eau SNMR, résistivité électrique, chargeabilité..... 77

Figure 3.23 : Sections horizontales du modèle 3D dans la ZNS à une élévation de 120 m (haut) et dans la zone saturée à une élévation de 110 m (bas). Les paramètres sont la teneur en eau SNMR (gauche), la résistivité électrique (milieu) et la chargeabilité (droite). Les points blancs représentent la position des forages. Les rectangles gris représentent les délimitations des zones Z1 et Z2 avec des anomalies. Les forages dont les données sont valorisées (SC05-6-7-8-9) sont représentés avec des points noirs sur la section de teneur en eau SNMR à 110 m (Ryckebusch et al., 2024). 78

Figure 3.24 : (A) section verticale de teneur en eau SNMR (haut), résistivité électrique avec les logs BER (de gauche à droite : SC06-5-7-9) (milieu), chargeabilité (bas) extraits du modèle 3D.

La ligne bleue est le niveau piézométrique. Les flèches grises représentent les positions des zones Z1 et Z2 (Figure 3.23). Les lignes noires en trait plein et trait tiret représentent respectivement les positions des logs 1D extraits de la section verticale 2D dans chaque zone. Les lignes blanches pleines sont les iso-lignes de résistivité électrique à 150 $\Omega.m$ et 350 $\Omega.m$ et la ligne blanche trait tiret est l'iso-ligne de chargeabilité à 3 mV/V. (B) Logs 1D de teneur en eau SNMR, résistivité électrique et chargeabilité, extraits de la section verticale 2D respectivement dans la zone Z1 (trait plein) et Z2 (trait tiret). La ligne noire représente le niveau piézométrique (Ryckebusch et al., 2024). 79

Figure 3.25 : Logs des forages SC06 (Z1, bleu), SC05-7-8 (Zi, vert) et SC09 (Z2, rouge) en (A) BER, (B) densité, (C) teneur en eau total BNMR sans SC09 et (D) T_{2ML} BNMR sans SC09. La ligne bleue représente le niveau piézométrique et les lignes noires traits tiret représentent les limites des couches interprétées (extrait de Ryckebusch et al., 2024). 81

Figure 3.26 : (A) Section verticale extraite du modèle ERT 3D et les forages BER. (B) Profil ERT deux fois plus long et coupé à la position de la section verticale en (A) pour la comparaison. Noter que les échelles de couleur sont différentes. Celles-ci ont été choisies pour rendre visible la cohérence des variations de résistivité et non des valeurs. Les lignes bleues représentent le niveau piézométrique. 83

Figure 3.27 : (A) Logs 1D de résistivité électrique extraits du modèle ERT 3D à la position des forages SC05-6-7-8-9. (B) Logs BER pour les forages SC05-6-7-8-9. La ligne noire est un modèle synthétique de résistivité électrique basé sur les données BER et la ligne grise est l'inversion ERT de ce modèle synthétique. La ligne bleue est le niveau piézométrique. Les lignes noires en trait tiret sont les limites des couches interprétées. 84

Figure 3.28 : (A) Teneur en eau SNMR extrait du modèle 3D à la position des forages SC05-6-7-8. (B) Teneur en eau totale BNMR dans les forages SC05-6-7-8. Noter la différence d'échelle entre les teneurs en eau SNMR et BNMR. (C-D) Distribution de teneur en eau BNMR dans les forages SC06 (Z1) et SC07 représentative des forages SC05-7-8 (Zi). (E) T_{2ML} BNMR des forages SC05-6-7-8 associé à la taille moyenne des pores. La ligne bleue correspond au niveau piézométrique. Les lignes noires traits tiret correspondent aux limites des couches interprétées (Ryckebusch et al., 2024). 85

Figure 3.29 : (A) et (B) Teneur en eau distribuée BNMR et teneur en eau BNMR pour les T_2 inférieurs au dead-time SNMR (40 ms) pour les forages SC06 et SC05-7-8. (C) Teneur en eau totale BNMR (points), teneur en eau BNMR pour les T_2 plus grand que le dead-time (40 ms) (ligne), teneur en eau SNMR (ligne traits tiret) (Ryckebusch et al., 2024). 86

Figure 3.30 : Modèle lithologique basé sur les interprétations géophysiques aux échelles multi-décamétriques et de forage en comparaison, comparé à la connaissance de la géologie du site illustrée par le log lithologique synthétisé par Aldana et al., (2021). La ligne bleue représente le niveau piézométrique (modifié de Ryckebusch et al., 2024). 88

Figure 3.31 : Modèle schématique de teneur en eau des calcaires fracturés de Beauce basé sur les teneurs en eau BNMR > 40 ms des forages SC05-7-8 (Zi). La ligne noire est le niveau piézométrique. L'eau capillaire, la porosité effective et le « specific yield » correspondent au modèle simplifié basé sur le modèle conceptuel de porosité de Lubczynski and Roy, (2005)

(Figure 2.1). Le trait tiret rouge correspond à la valeur de teneur en eau mesurée à saturation sur les échantillons par (Aldana, 2019). (Modifié de Ryckebusch et al., 2024).	89
Figure 3.32 : (A) Trace de l'acquisition TTEM mesuré en août 2022 sur les sites OZNS et GB. (B) Position des profils ERT mesurés en septembre 2020 sur le site GB.	91
Figure 3.33 : Section horizontale du modèle 3D de résistivité électrique TTEM dans la ZNS (gauche, Z = 115 m) et dans la zone saturée (droite, Z = 105 m). Les rectangles indiquent la position des sites GB et OZNS.	92
Figure 3.34 : Imagerie ERT dipôle-dipôle GB1et GB2 sur le site de GB, comparés à une tomographie dipôle-dipôle similaire sur le site OZNS . La double flèche indique l'emplacement de la boucle SNMR de monitoring et la ligne noire le niveau piézométrique est indiqué à gauche des sections.	92
Figure 3.35 : Teneur en eau SNMR 1D extrait du modèle 3D OZNS (sondages SC05-6-7-8-9) et teneur en eau SNMR mesurée à GB le 04/09/20 pendant le monitoring SNMR 2020-2021.	93
Figure 4.1 : Schéma du modèle réservoir utilisé dans GARDENIA pour le calcul de la pluie efficace (Thiery, 2014).	98
Figure 4.2 : Localisation du centre des mailles SAFRAN (maille de 8km de coté) avec leurs numéros. Le centre de la maille Villamblain (2923) est proche des sites OZNS et GB.	98
Figure 4.3 : Variations du niveau piézométrique observée à Villamblain (rouge) et simulée (vert) dans GARDENIA avec un modèle réservoir calculant la pluie efficace.	99
Figure 4.4 : Variation annuelle de pluie efficace calculée avec le logiciel GARDENIA. Le trait tiret montre un cycle pluriannuel d'environ 15 ans de ces variations.	100
Figure 4.6 : Dispositif de mesure avec (A) le regard de sortie des câbles de la boucle Tx-Rx carrée 75 m 1 tour + une rallonge pour brancher la boucle à l'appareil, (B) la boucle de bruit Nx carrée 10 m, (C) une carte du site Grand Bois avec la boucle Tx-Rx, la boucle de bruit Nx et le piézomètre BSS 03622X0119/FP3-25 (X0119 sur la Figure 4.6.C).	102
Figure 4.7 : Niveaux de bruit ambiant mesurés pendant le monitoring pour chaque sondage avec la valeur moyenne (barre noire) et les écarts types (barres rouges).	104
Figure 4.8 : Comparaison des niveaux de bruits ambiants mesurés pendant les monitorings 2020-2021 et 2022-2024.	104
Figure 4.9 : (Haut) Fréquence de Larmor mesurée par pulse pour chaque sondage lors du monitoring 2020-2021. (Bas) Fréquence de Larmor appliquée par pulse pour chaque sondage lors du monitoring 2022-2024. La bande rouge présente une bande de ± 10 Hz autour de la fréquence 2050 Hz, harmonique du 50 Hz.	105
Figure 4.10 : Comparaison de différents filtrages sur les paramètres : (Haut) d'amplitude E0 maximale, (Bas) de qualité : signal sur bruit (= S/N) et bruit (= EN/IN).	107

Figure 4.11 : Comparaison des différents filtrages sur les paramètres de : hauteur d'eau SNMR sur la colonne 0 – 23 m, constante de temps de relaxation T_2^* et T_1 sur les pulses au S/N le plus élevés à 2100 A.ms (voir le filtrage des données SNMR OZNS). En complément, sont présentés la pluie efficace mensuelle et le niveau piézométrique (courbe bleue)..... 108

Figure 4.12 : Modèle synthétique de teneur en eau SNMR (A) inversé indépendamment en 1D sans variations temporelles, (B) inversés indépendamment en 1D avec les variations temporelles du bruit ambiant mesuré. (C) Sondages de teneur en eau SNMR mesurés et inversés indépendamment en 1D. La courbe noire représente le niveau piézométrique..... 110

Figure 4.13 : (A) Modèle synthétique de teneur en eau SNMR. (B-D) Inversion time-lapse du modèle synthétique sans contrainte sur la RMSE et respectivement sans et avec bruit mesuré. (B-D) Inversion time-lapse du modèle synthétique avec une contrainte sur la RMSE (inférieure à 5 nV) et respectivement sans et avec bruit mesuré..... 111

Figure 4.14 : Variations temporelles des hauteurs d'eau SNMR calculées de 0 à 21 m pour le modèle synthétique et les modèles inversés en time-lapse (TL) présentés dans la Figure 4.13. La courbe bleue représente le niveau piézométrique. 112

Figure 4.15 : Modèle de teneur en eau SNMR du monitoring 2022-2023, inversé en time-lapse avec une contrainte sur la RMSE qui doit être inférieure à 15 nV. La courbe noire représente les variations du niveau piézométrique. 112

Figure 4.16 : Variations temporelles de la hauteur d'eau SNMR (Hw) entre octobre 2022 et juillet 2024. Les hauteurs d'eau ont été calculées sur une épaisseur de 20 m (entre 108.5 m et 128.5 m) à partir du modèle de teneur en eau SNMR (monitoring) inversé en time-lapse. La courbe bleue représente le niveau piézométrique. Les courbes noires représentent le cumul de la pluie efficace pour les deux années 2022-2023 et 2023-2024. Les flèches vertes représentent le décalage temporel entre le début de l'augmentation de la hauteur d'eau SNMR et l'augmentation du niveau piézométrique. Les cadres noirs délimitent les deux années étudiées : 2022-2023 et 2023-2024. 113

Figure 4.17 : Synthèse de la comparaison des résultats pour les différentes années de monitoring. Les lignes surlignées en vert représentent les années favorables pour faire un monitoring de teneur en eau SNMR et les lignes surlignées en orange présentent les années défavorables. 115

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Valeurs de teneur en eau à saturation (Θ_{sat}), de conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) et de porosité totale (ϕ_{Tot}) et connectée (Φ_c) mesurées sur des échantillons de roche prélevés dans le sondage SC02 à la presse hydraulique par (Aldana, 2019). CV est le coefficient de variation lié à l'erreur de mesure pour chaque essai.	27
Tableau 2.1 : Paramètres de la loi d'Archie calculés par (Abbas et al., 2022) pour les calcaires de Beauce sur le site OZNS.....	51
Tableau 3.1 : Caractéristiques de mesure des données géophysiques de surface et de tomographie géoradar en forage.....	52
Tableau 3.2 : Récapitulatif des mesures de diagraphies réalisées dans les forages (voir rapport d'acquisition BRGM RP-72842-FR, (Baltassat et al., 2025)).....	53
Tableau 3.3 : Caractéristiques des sondages SNMR réalisés sur OZNS en août-septembre 2020. Tx-Rx = boucle émission-réception ; Nx = boucle de mesure de bruit éloigné (Figure 3.1), dispositif NUMIS ^{POLY} ; SQ50 2t = boucle carrée de 50 m de côté 2t.....	54
Tableau 3.4 : Traitement NUMPro retenu pour chaque sondage.....	56
Tableau 3.5 : Rappels de S/N et EN/IN et valeurs de E0max, T2* estimé et T1 estimé pour chaque sondage.	58
Tableau 3.6 : Dans la zone saturée, teneur en eau totale BNMR comparée à la porosité d'Archie calculée à partir des valeurs moyennes BER et des paramètres de la Loi d'Archie calculés par Abbas et al., (2022) pour les calcaires fractures saturés d'OZNS (Ryckebusch et al., 2024)..	82
Tableau 4.1 : Récapitulatif des sondages réalisés lors du monitoring sur le site de Grand Bois et leurs principales caractéristiques.....	103
Tableau 4.2 : Stratégies de traitements testées lors du monitoring 2020-2021.....	106

Introduction générale

La zone non saturée (ZNS) est la partie supérieure de la zone critique (Hermans et al., 2023) qui fait la transition entre la surface et la zone saturée, sous le niveau piézométrique. A ces profondeurs le milieu est constitué de solide (sol, roche), de liquide (eau) et de gaz (air). Le milieu étant à saturation variable, la pression est également variable sur la colonne et les propriétés d'écoulement et de rétention d'eau dépendent de celle-ci, de la porosité et des caractéristiques lithologiques du milieu. De plus, cette zone est à la fois à l'équilibre chimique avec l'atmosphère de surface, la chimie souterraine et présente une activité liée aux systèmes racinaires et aux micro-organismes du sous-sol, ce qui lui ajoute une complexité supplémentaire. C'est donc un environnement complexe, dynamique et difficile à caractériser (Covington et al., 2023; Hermans et al., 2023).

En hydrogéologie, les processus de transfert d'eau dans la ZNS depuis la surface jusqu'à la nappe sont généralement simplifiés vu leurs complexités. Généralement, la recharge de la nappe est estimée au moyen de modèles conceptuels à réservoirs (e.g. GARDENIA, GR4) qui prennent en compte les processus de la ZNS avec des paramètres non physiques. Cette approche par modèle réservoir permet d'estimer un volume de pluie efficace à partir de sources (pluviométrie) et de puits (évapotranspiration) homogènes. Cette pluie efficace est ensuite répartie entre une composante de ruissellement et une composante de recharge. Cependant, cette approche est insuffisante pour caractériser un milieu complexe et hétérogène 3D pour des applications telles que l'agriculture de précision ou l'infiltration de polluants (Hermans et al., 2023).

Les milieux carbonatés sont généralement caractérisés par trois types de porosité : (1) la porosité primaire ou matricielle associée à la formation sédimentaire de la roche calcaire. (2) La porosité de fracture causée par l'altération et la fracturation de la roche. (3) La porosité de conduit, ou conduit karstique, causée par un élargissement des réseaux de fractures en réseaux de conduits karstiques. Ces porosités se distinguent par leur capacité à stocker ou transférer l'eau. La porosité de matrice a une faible perméabilité et est généralement négligée dans les modèles d'écoulements car associée à du stockage. Les porosités de fractures ont une perméabilité plus importante et assurent à la fois des fonctions de stockage et de transport. La porosité de conduit karstique assure une fonction de transport. La perméabilité du milieu et les temps de transferts sont donc dépendants de l'échelle d'étude et du volume considéré en fonction de la proportion de porosité de matrice par rapport à la porosité de fracture et de conduit karstique. Plus le volume exploré est important et plus la perméabilité sera élevée car une proportion plus importante de porosité de fracture et de conduit karstique sera intégrée (Covington et al., 2023). Par exemple, (Spellman et al., 2022) ont calculé des temps de transferts dans un milieu calcaire présentant du karst et avec une ZNS épaisse. Dans leur cas, le flux de conduit a un temps de transfert de moins d'une heure, le flux de conduit/matriciel a un temps de transfert moyen d'environ 3h et maximal d'environ 21 jours. Enfin le flux de matrice a un temps de transfert de l'ordre de plusieurs mois à plusieurs dizaines d'années.

L'étude est basée sur le site de Villamblain dans l'Aquifère de Beauce, aquifère sujet à un conflit d'usage sur la ressource en eau et à la problématique d'infiltration des polluants. Cet aquifère est suivi de longue date sur les premiers mètres de sol par l'INRAE (e.g. Schnebelen et al. 1999; Schnebelen 2000; Ould Mohamed 1995) et par des études hydrogéologiques permettant de construire des modèles de gestion de l'Aquifère à l'échelle régionale (e.g. Martin 2000; Bonnet, Floriat 2004). Les calcaires de Beauce sont un calcaire lacustre de composition variée - bien qu'à dominance calcaire. Il est altéré, fissuré et karstifié, de façon variable ce qui renforce sa complexité. Cependant, la ZNS profonde de l'aquifère est peu ou pas étudiée, ne permettant pas de caractériser correctement les flux hétérogènes locaux tels que les fractures/conduits karstiques influant sur les temps de transferts locaux. Les méthodes géophysiques, classiquement utilisées en hydrogéologie pour délimiter la géométrie des aquifères et caractériser les propriétés physiques de la sub-surface (Binley et al., 2015), sont particulièrement indiquées pour caractériser cette ZNS profonde difficile à instrumenter depuis la surface. Par exemple, la méthode de résonance magnétique nucléaire (NMR) est une méthode dont les paramètres sont directement liés à la teneur en eau, et permet d'imager la teneur en eau du sous-sol à plusieurs échelles : surface (SNMR), forage (BNMR) et laboratoire (Lab-NMR) (Behroozmand et al. 2015; Legtchenko 2013). Les propriétés électriques mesurées par les méthodes de tomographie de résistivité électrique (ERT) et de polarisation provoquée (IP), sont reliés aux paramètres hydrogéologiques de teneur en eau et de porosité avec des relations pétro-physiques établies en laboratoire telles que la loi d'Archie, qui relie la résistivité électrique à la teneur en eau (Binley et al., 2015).

Plusieurs auteurs ont proposé des approches géophysiques multi-méthodes et multi-échelles pour caractériser des milieux hétérogènes ou construire des modèles hydrogéologiques. Par exemple, (Comte et al., 2019) ont combiné des données de laboratoire, des observations de terrain, des mesures ERT et SNMR et des relations pétro-physiques pour caractériser la lithologie et les propriétés hydrauliques d'un aquifère micaschiste à l'échelle du bassin versant et construit un modèle conceptuel pour aider à paramétrer un modèle hydrogéologique. Cette approche a été appliquée sur la zone saturée. (Flinchum et al., 2019) ont combiné des données SNMR et BNMR avec des données de sismique réfraction pour caractériser le profil d'altération de la ZNS d'un aquifère granitique. Ils ont distingué la saprolite saturée, non saturée et la roche fracturée avec les variations de teneur en eau et de temps de relaxation NMR et ont observé la variabilité latérale en combinant les données NMR et sismique réfraction. La NMR est également appliquée seule pour caractériser des aquifères ou pour contraindre des modèles hydrogéologiques. Par exemple, (Mazzilli et al., 2016) ont fait des mesures SNMR sur différentes unités géologiques dans un aquifère karstique et quantifié la teneur en eau SNMR de calcaires marneux, calcaires siliceux et de dolomites. Cependant, l'essai de suivi temporel de la teneur en eau SNMR n'a pas montré de variations significatives interprétés comme associés aux écoulements rapides dans les karsts par rapport au pas de temps mensuel appliqué lors du suivi SNMR. (Mazzilli et al., 2020) ont montré ensuite qu'un monitoring SNMR pendant et à la suite d'un événement pluvieux important permet de suivre l'infiltration d'eau dans la ZNS d'un aquifère karstique. (Lesparre et al., 2020) utilisent des sondages SNMR pour contraindre à posteriori la paramétrisation d'un modèle hydrogéologique de zone non saturée sur un aquifère montagneux. Les paramètres contraints du modèle sont l'épaisseur de l'aquifère, la porosité et la conductivité hydraulique. Le modèle hydrogéologique estime les débits des cours d'eau et les charges hydrauliques. Le modèle de Van Genuchten est utilisé pour calculer

la distribution verticale de teneur en eau, elle-même utilisée comme modèle direct pour simuler un signal SNMR correspondant, ensuite comparé aux signaux SNMR mesurés.

La problématique de cette thèse est d'améliorer les modèles d'écoulements hydriques de la ZNS dans un contexte d'infiltration de polluant, en intégrant les hétérogénéités hydriques locales de la ZNS profonde, caractérisées à l'échelle décamétrique avec des méthodes géophysiques et plus particulièrement la SNMR. Pour répondre à cette problématique, les objectifs sont les suivants :

- Caractériser les hétérogénéités lithologiques et hydriques locales de la ZNS pouvant influencer les temps de transferts dans la ZNS grâce à une approche géophysique multi-méthode s'adressant à différents volumes représentatifs de l'échelle du forage à l'échelle de la parcelle
- Evaluer la recharge annuelle par un suivi du stock d'eau dans la ZNS avec un monitoring SNMR, comparé à des monitorings SNMR existants mesurés dans des conditions hydrométéorologiques différentes
- Proposer un modèle amélioré des transferts hydriques de la ZNS à l'échelle décamétrique sur le site d'étude, tenant compte des hétérogénéités lithologiques et hydriques.

Ce travail de thèse s'articule en quatre parties. La Partie 1 porte sur le contexte de l'étude, la présentation du site d'étude de Villamblain et les données disponibles. La Partie 2 présente un état de l'art et des rappels théoriques sur les méthodes utilisées : d'une part les équations qui régissent l'écoulement dans la ZNS, certaines lois utilisées pour représenter la relation teneur en eau/pression et conductivité hydraulique dans la ZNS, d'autre part les méthodes géophysiques déployées. Les résultats et discussions sont divisés en deux parties. La Partie 3 porte sur la caractérisation hydro-géophysique des variabilités lithologiques et hydriques du site OZNS à partir de données géophysiques multi-méthodes mesurées en surface 3D (SNMR, ERT/IP) et en forage (BNMR, résistivité électrique, densité) et interprétées ensemble. Les résultats sont ensuite discutés sur leur applicabilité au site GB et vis-à-vis du problème d'échelle. La Partie 4 porte sur le suivi temporel du stock d'eau dans la ZNS avec un monitoring SNMR sur le site GB. Celui-ci est traité et interprété puis discuté avec d'autres monitorings SNMR existants mesurés sur le même site pour déterminer les conditions de suivi du stock d'eau de la ZNS par monitoring SNMR. Les Parties 3 et 4 sont chacune terminées par un chapitre de synthèse. La Partie 4 est suivie des conclusions et perspectives.

Partie 1: Contexte de l'étude et description du site de Villamblain

Chapitre 1.1 : L'Aquifère de Beauce et le site de Villamblain

1.1.1 Présentation générale de l'Aquifère de Beauce

L'aquifère des Calcaires de Beauce s'étend sur 9000 km² sur les bassins versants de la Seine et de la Loire (Figure 1.1). La géologie de l'Aquifère comprend plusieurs couches aquifères perméables de calcaires oligocènes et éocènes, intercalés avec des couches semi-perméables argileuses ou marneuses. Le tout repose sur la Craie du crétacé, séparé par des argiles silex constituant le fond imperméable de l'Aquifère. Les niveaux de calcaires producteurs constituant communément la « nappe de Beauce » sont les Calcaires d'Etampes et de Pithiviers (Martin, 2000). La Figure 1.2 montre une vue 3D globale de la géologie à l'affleurement, et une section verticale sur le bord sud du modèle des formations de l'aquifère de Beauce.

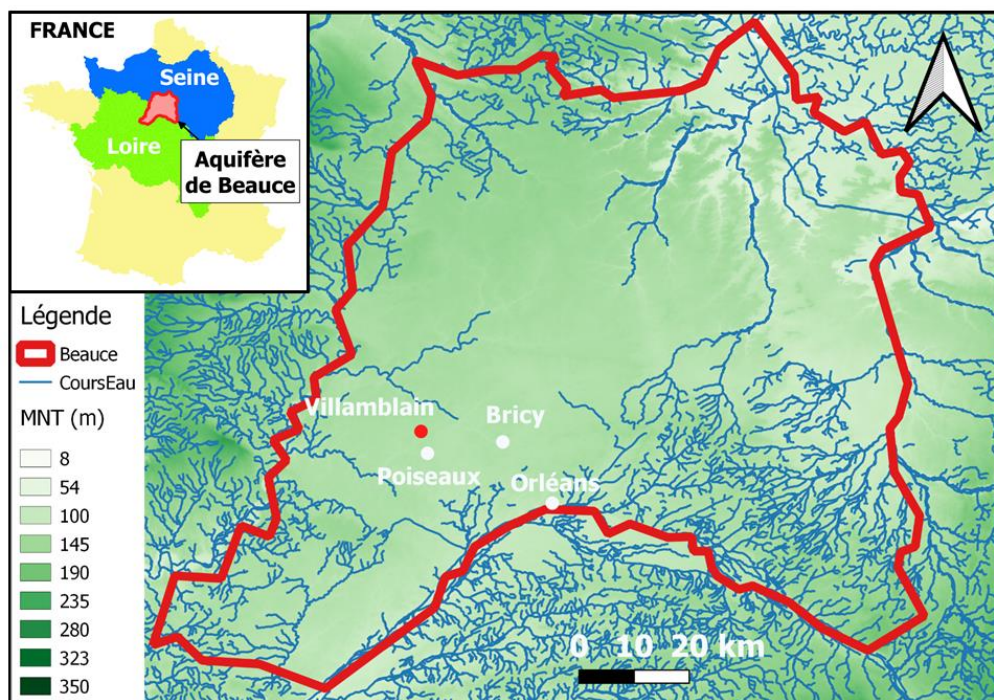


Figure 1.1 : Emprise de l'aquifère de Beauce par rapport aux bassins versants de la Seine et de la Loire, le réseau hydrographique de surface et l'altimétrie. Sont également situés Villamblain (site d'étude), Poiseaux (données piézométriques), Bricy (données météorologiques) et Orléans.

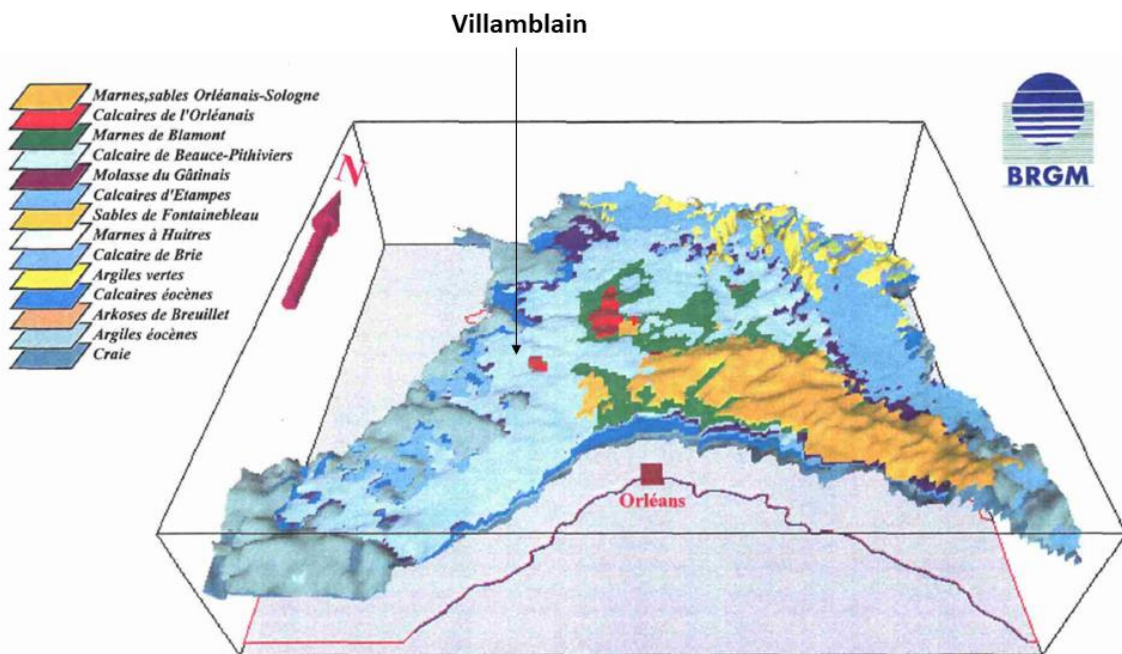


Figure 1.2 : Vue 3D de la géologie à l'affleurement pour l'ensemble des formations du système aquifère de Beauce. Villamblain est pointé pour faciliter sa localisation dans la géologie de l'aquifère. Figure modifiée de (Martin et al., 1999).

Le SAGE Nappe de Beauce (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux, <https://www.sage-beauce.fr>) fait un état des lieux et un document de Politique d'Aménagement et de Gestion Durable de la ressource pour l'Aquifère de Beauce.

La Beauce est l'une des régions les plus cultivées et sèches de France (de Frutos Cachorro et al., 2017) avec des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 600 mm (Figure 1.3) et une surface agricole utile représentant 90 % de la surface du SAGE Nappe de Beauce. La faible quantité de précipitations annuelles, couplée à l'usage agricole, crée un besoin important de prélèvements d'eau pour l'irrigation des surfaces agricoles notamment pendant les périodes estivales. Ce besoin est accentué en période de sécheresse comme celle de 2003 durant laquelle les prélèvements pour usage agricole ont représenté plus de 80 % des prélèvements totaux comprenant également des prélèvements pour l'alimentation en eau potable et l'industrie (Figure 1.4) (SAGE, 2013a).

L'augmentation des prélèvements en période de sécheresse fait baisser considérablement le niveau de la nappe de Beauce et crée des conflits d'usage nécessitant de limiter les prélèvements en fonction du niveau piézométrique pour éviter que ceux-ci ne soit supérieurs à la recharge annuelle de la nappe (AELB, 2019). Il y a donc en premier lieu un enjeu sur la préservation et la gestion quantitative de la ressource en eau afin de satisfaire l'ensemble des besoins en eau. (SAGE, 2013b). En dehors de sa partie sud couverte par la forêt d'Orléans, la nappe de Beauce est caractérisée par l'absence de couches imperméables en surface rendant la nappe vulnérable (Figure 1.5) à l'infiltration de polluants comme les nitrates, pollution majoritairement d'origine agricole avec l'usage d'engrais et fertilisants (SAGE, 2013a, 2013b). En conséquence de quoi la région de Beauce est l'une des régions présentant des teneurs en nitrates les plus élevées dans les sols comme dans les nappes phréatiques (Figure 1.6).

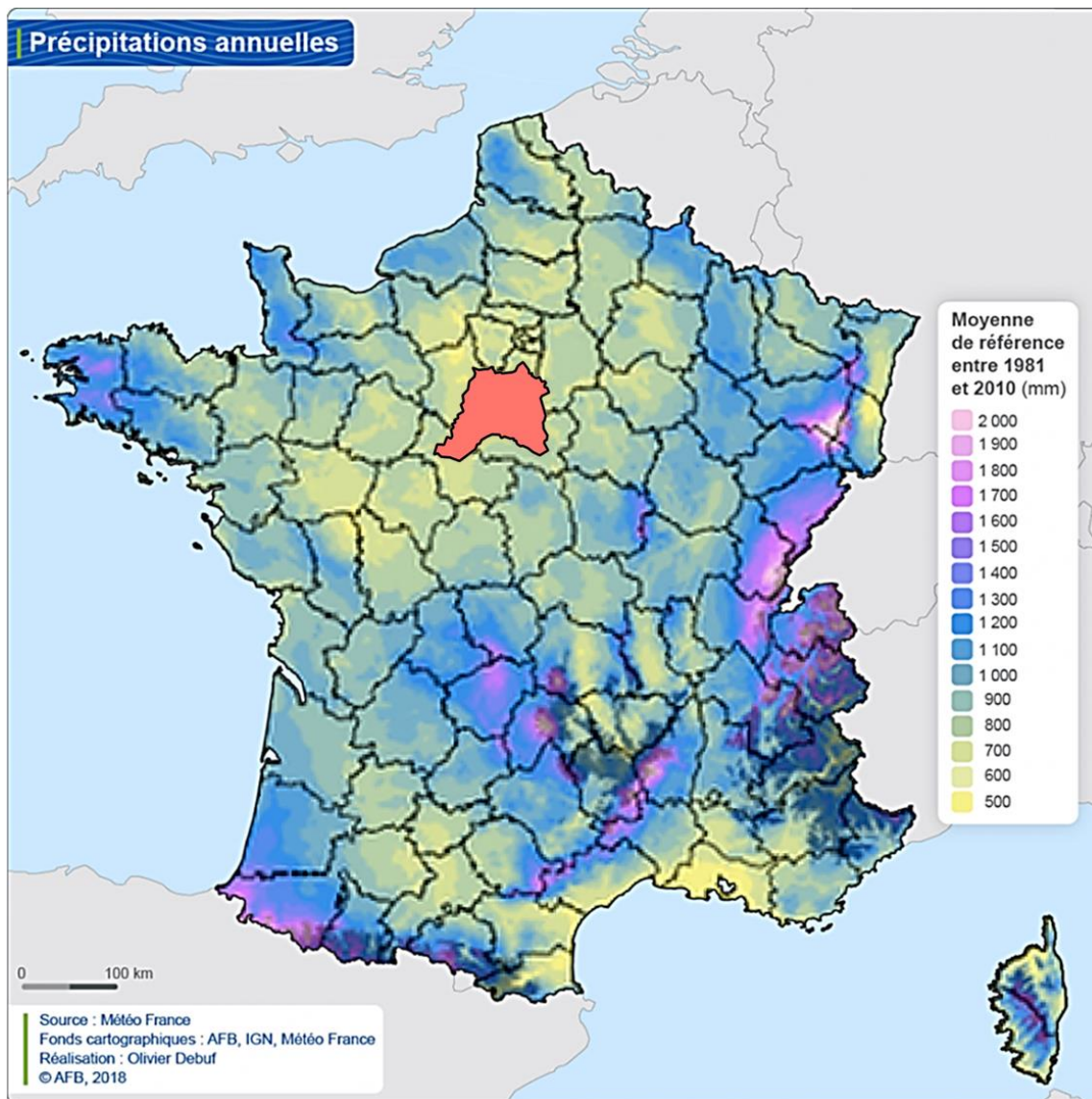


Figure 1.3: Précipitations annuelles moyennes (mm) entre 1981 et 2010 en France et position de l'Aquifère de Beauce (Modifié de <https://www.eaufrance.fr/les-volumes-de-precipitations>).

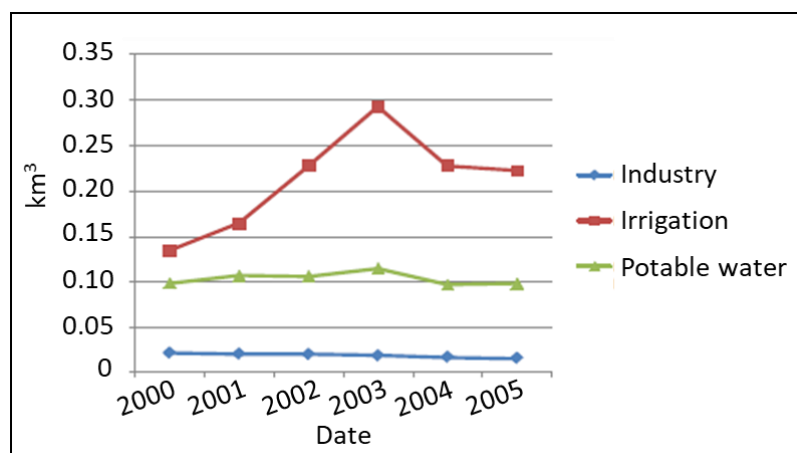


Figure 1.4: Evolution des prélèvements en eau en m³ dans la nappe entre 2000 et 2005 (SAGE, 2013a).

Cette pollution tend à s'aggraver au fil du temps et la préservation de la qualité de l'eau représente un enjeu majeur du SAGE Nappe de Beauce dont l'objectif d'atteinte d'une bonne qualité chimique des masses d'eaux souterraines est fixé à 2027 par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), directive européenne adoptée le 23 octobre 2000 et transposée en droit français le 21 avril 2004 (SAGE, 2013a, 2013b).

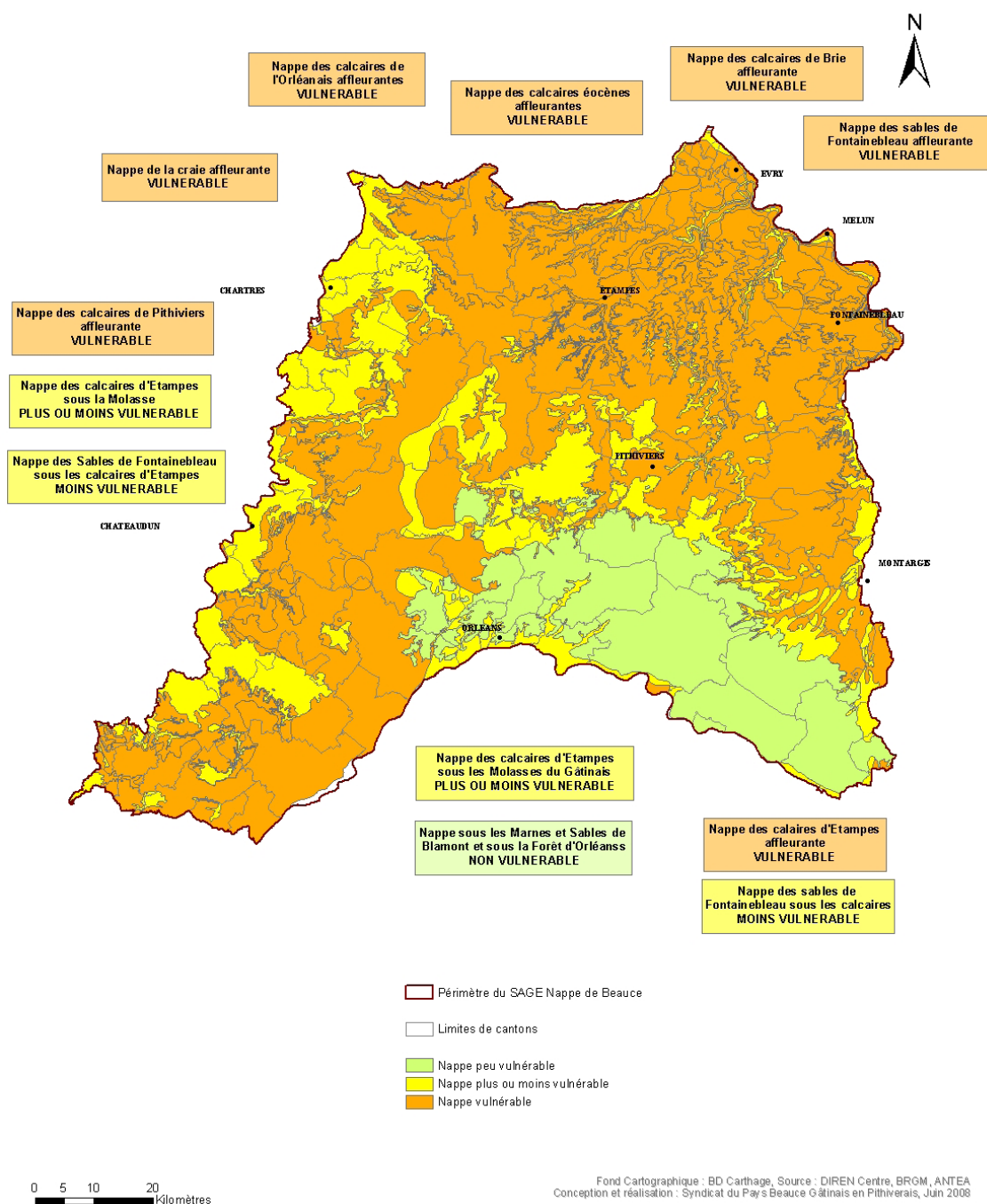
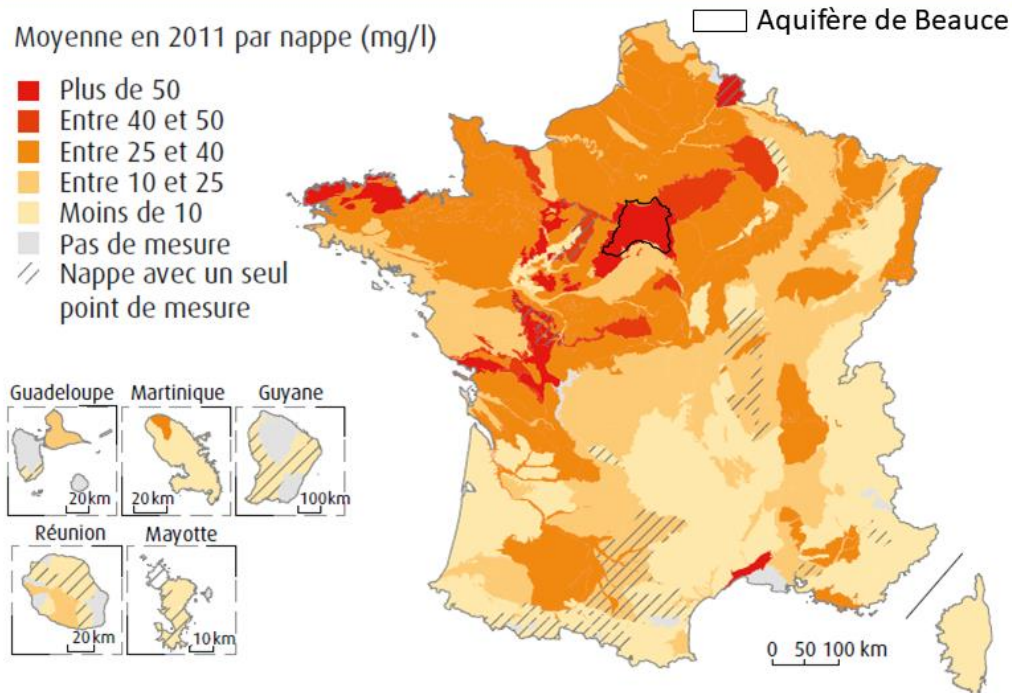


Figure 1.5: Carte de vulnérabilité de la nappe de Beauce dans le périmètre du SAGE Nappe de Beauce (SAGE, 2013a).

Carte 2 : concentration moyenne en nitrates dans les nappes phréatiques, en 2011



Source : agences de l'eau, offices de l'eau – BRGM, banque de données ADES, 2012
Réseaux RCS, RCO – SOeS d'après la BDRHFV1 du BRGM – Traitements : SOeS, 2013.

Figure 1.6 : Concentrations moyennes en nitrate dans les nappes phréatiques en France. (Figure modifiée de (Commisariat général au développement durable, 2013)).

1.1.2 Site de Villamblain et contexte hydrométéorologique

Présentation du site de Villamblain

La commune de Villamblain se situe dans la partie ouest de l'aquifère et dépend du bassin versant de la Loire (Figure 1.2 et Figure 1.1). D'après la Figure 1.1, le réseau hydrographique étant éloigné de cette zone, il y a une forte infiltration de l'eau dans le sol et pas de ruissellement de surface (Flipo et al., 2012; Schnebelen et al., 1999). A Villamblain, la géologie indique la succession suivante (de haut en bas) : Calcaire de Beauce-Pithiviers, suivi par les molasses du Gâtinais puis par les Calcaires d'Etampes (Figure 1.2).

Villamblain comprend deux sites d'études : le site de Grand Bois et le site O-ZNS (Observatoire de la Zone Non Saturée). La Figure 1.7 présente la localisation des deux sites à Villamblain. Grand Bois est le site d'étude où ont été menées des études géophysiques et notamment SNMR dès les années 2000 afin de caractériser le milieu complexe des Calcaires de Beauce sur un champ cultivé vis-à-vis de la problématique de pollution aux nitrates (Legchenko et al., 2022, 2020). Le site O-ZNS est l'une des plateformes du programme PIVOTS ayant pour objectif d'étudier les pollutions dans la région Centre-Val-de-Loire.

Le site consiste en un puit instrumenté de 4 m de diamètre et de 20 m de profondeur, entouré de 8 forages, dont le but est d'étudier la zone non saturée profonde de l'aquifère de Beauce. Les deux sites d'étude sont à une distance de 1.4 km ce qui laisse suggérer qu'il peut y avoir une variabilité spatiale lithologique entre les deux sites. De plus, leur mode d'occupation est différent : le site de Grand Bois est cultivé alors que le site O-ZNS est à proximité d'un champ cultivé mais le site lui-même où se situe le puit ne l'est pas. Cinq forages BSS situés à proximité des deux sites (Figure 1.7) permettent d'avoir une description lithologique globale de la zone d'étude (Figure 1.8) et d'en apprécier la variabilité spatiale.

D'après la Figure 1.8, la lithologie globale du site de Villamblain regroupe 5 unités de haut en bas : (1) une unité de sol argileux hétérogène, (2) une unité de calcaire hétérogène très altéré argileux, (3) une unité de calcaire massif fracturé, (4) une unité de marnes de qualité variable, (5) une unité de calcaire. La Figure 1.2 permet d'identifier les unités (2) et (3) comme correspondant aux calcaires hétérogènes de Beauce-Pithiviers, l'unité (4) comme la molasse du Gâtinais et l'unité (5) comme les calcaires d'Etampes. Les profondeurs d'intérêt pour cette étude sont celles de la zone non saturée profonde soit l'unité des calcaires hétérogènes de Beauce-Pithiviers.

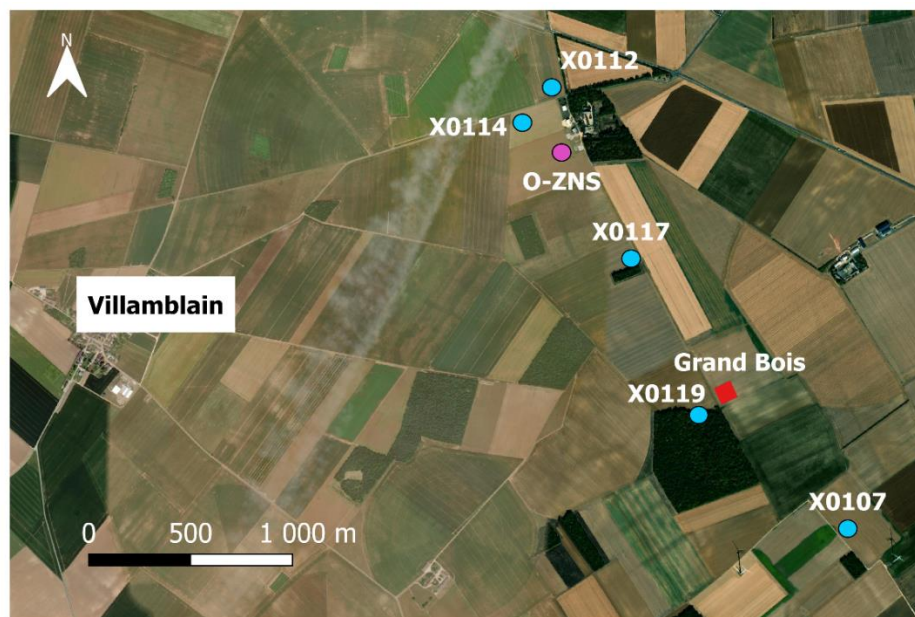


Figure 1.7: Localisation des sites d'étude Grand Bois et O-ZNS à Villamblain et des forages BSS à proximité des deux sites.

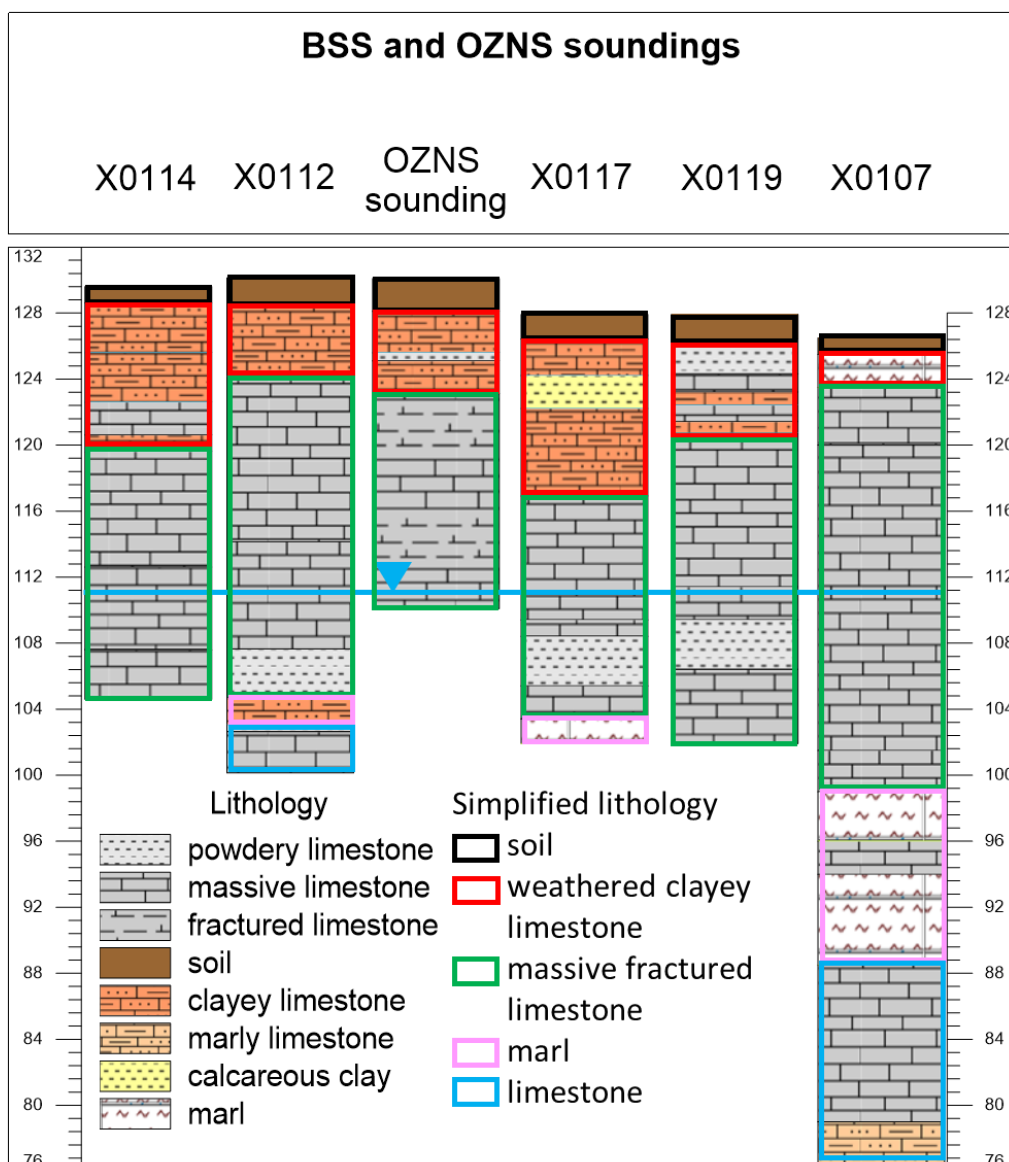


Figure 1.8 : Lithologie du site de Villamblain décrite à partir des forages situés à proximité des sites Grand Bois et O-ZNS. La lithologie simplifiée décrit les grands ensembles communs à tous les forages.

Contexte hydrométéorologique

Le climat du site est continental-tempéré avec une température moyenne annuelle de 10.5 °C (Aldana et al., 2021). Les données météorologiques de pluviométrie et d'évapotranspiration potentielle (ETP) proviennent de la station météorologique d'Orléans-Bricy et les données piézométriques proviennent de la station piézométrique de Poiseaux jusqu'en mars 2021 puis du site O-ZNS. Les stations d'Orléans-Bricy et de Poiseaux sont situées respectivement à 20 et 4 km de Villamblain (Figure 1.1). La Figure 1.9 présente les cumuls annuels de pluie et d'ETP de 1965 à 2024. Sur cette période, la pluviométrie annuelle moyenne est de 639 mm avec respectivement un minimum et maximum de 412 mm et 1008 mm en 1990 et 2001. L'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne est de 821 mm avec respectivement un minimum et maximum de 665 mm et 1024 mm en 1981 et 2020.

Pluviométrie et Evapotranspiration Potentielle (ETP) annuelle calculée du 01/09 (année N-1) au 31/08 (année N) de 1966 à 2024 (mm)

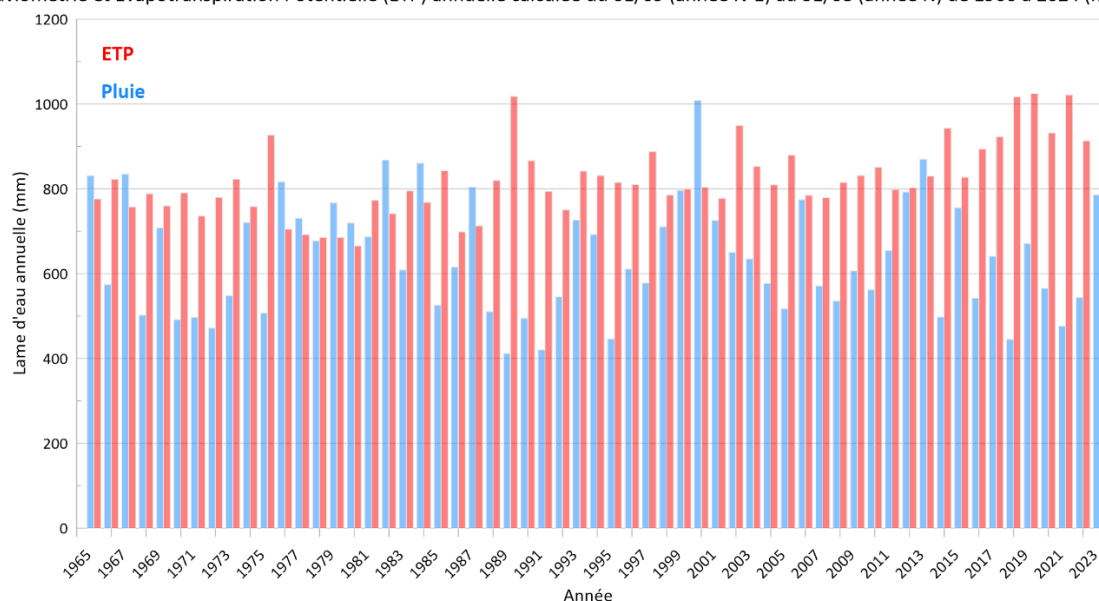


Figure 1.9: Pluviométrie (en bleu) et Evapotranspiration Potentielle (ETP) annuelle (en rouge) de 1966 à 2024.

La Figure 1.10 présente les variations du niveau piézométrique du site O-ZNS entre octobre 1965 et août 2024. La chronique complète est reconstituée à partir de deux séries : le niveau piézométrique mesuré à Poiseaux jusqu'en août 2021 puis le niveau piézométrique mesuré à OZNS à partir de mars 2021. Le calage a été fait sur la période commune entre mars et août 2021 avec un abaissement de 8.14 m du niveau piézométrique de Poiseaux pour correspondre au niveau piézométrique mesuré à OZNS. Entre octobre 1965 et août 2024, le niveau piézométrique moyen est de 110.79 m avec respectivement un minimum et maximum de 107.9 m et 115.5 m en octobre 1992 et en mai 2001. Le niveau piézométrique présente des variations annuelles et pluriannuelles de niveaux bas et hauts. Les variations annuelles ont une période d'environ 3 mois et les variations pluriannuelles ont une période d'environ 17 ans (Seguin, 2016).

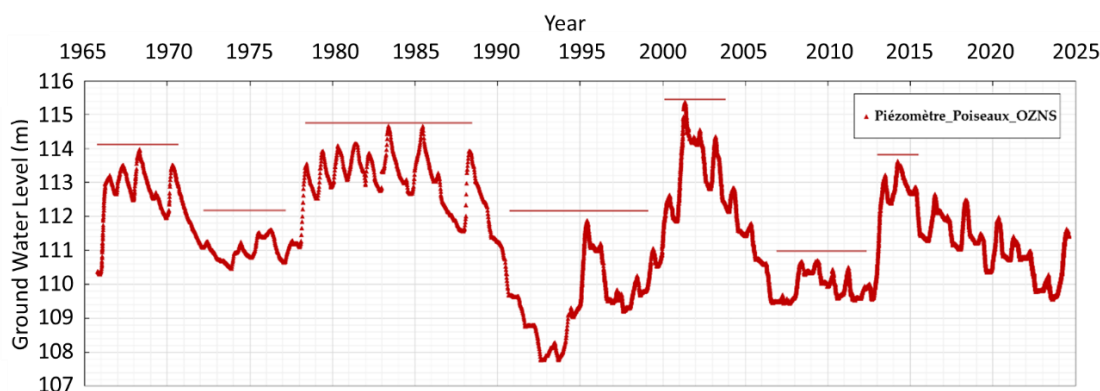


Figure 1.10: Variations du niveau piézométrique d'octobre 1965 à août 2024 sur le site OZNS. La chronique complète est reconstituée à partir de deux séries : le niveau piézométrique mesuré à Poiseaux jusqu'en août 2021 puis à OZNS à partir de mars 2021. Le calage a été fait sur la période commune entre mars et août 2021. Les traits rouges représentent les périodes hautes et basses du niveau piézométrique.

Chapitre 1.2 : Données existantes sur le site de Villamblain

Le site de Villamblain et particulièrement sa ZNS font l'objet de travaux de recherche depuis plus de 20 ans par l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) qui étudie l'unité de sol entre 0 et 2 m avec des mesures physiques, chimiques et de la modélisation hydrogéologique pour répondre à la problématique de la pollution aux nitrates (e.g. Schnebelen et al. 1999; Schnebelen 2000; Ould Mohamed 1995). Le site OZNS a également fait l'objet d'une étude lithologique et géophysique détaillée aboutissant à la construction d'un modèle local de fonctionnement de la ZNS (e.g. Aldana 2019; Aldana et al. 2021; Isch et al. 2022; Abbas et al. 2022) pour préparer la construction de l'Observatoire. Sur le site GB, plusieurs suivis temporels de la ZNS ont été faits avec des monitorings SNMR time-lapse en 1999-2000 et 2020-2021, le premier aboutissant à la construction d'un autre modèle local de fonctionnement de la ZNS (Legchenko et al., 2022, 2020). Cette partie présente les résultats lithologiques et géophysiques.

1.2.1 Caractérisation lithologique et géophysique du site O-ZNS : études précédentes

Plusieurs campagnes de mesures sur sondages carottés, mesures géophysiques et mesures en forage ont été menées sur le site afin de caractériser en détail sa lithologie avant le creusement du puit. La Figure 1.11 présente la position des sondages carottés extraits en 2017 (SC01-03 et SD1) et en 2020 (SC05-09) et les dispositifs géophysiques déployés lors des campagnes de mesure de 2018 et 2019.

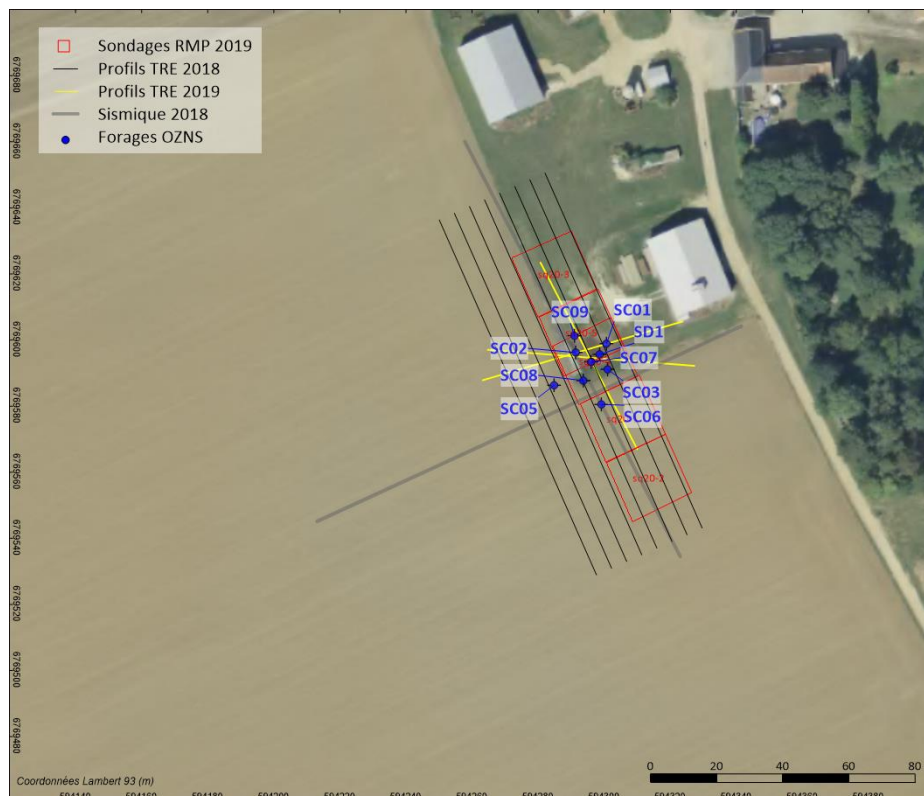


Figure 1.11: Localisation des données géophysiques acquises en 2018 et 2019 et de l'ensemble des forages sur le site O-ZNS.

(Aldana, 2019) a caractérisé au laboratoire les propriétés lithologiques, hydrauliques et géotechniques des échantillons extraits des sondages carottés SC01-SC03. La Figure 1.12 présente la lithologie des sondages SC01-SC03 de 10 à 20 m décrite à partir des échantillons. La lithologie des trois sondages montre une hétérogénéité importante des calcaires dans la ZNS avec pour :

- SC03 un calcaire majoritairement fracturé,
- SC01 un calcaire fracturé jusqu'à 13.5 m de profondeur puis une alternance entre calcaire fracturé et calcaire fracturé altéré,
- SC02 un calcaire fracturé altéré argileux sur les couches 10-12 m et 15.5-17.5 m et une alternance entre calcaire fracturé et calcaire fracturé altéré pour les autres couches.

La couche de calcaire altéré est composée de deux types de lithologies : un calcaire poudreux, argileux et incohérent entrecoupé de sable calcaire. La couche de calcaire massif est décrite comme un calcaire riche en carbonate (< 90 %) et en calcite et contenant dans ses extrémités inférieures et supérieures des microfissures, fractures, dissolutions initiant une karstification et une matrice altérée.

Pour caractériser plus précisément l'altération de la matrice calcaire, (Aldana, 2019) et (Aldana et al., 2021) a fait des analyses chimiques et des observations sur lame mince de la microstructure de la matrice calcaire. La Figure 1.13 présente une observation sur lame mince et une analyse chimique d'une micro-fissure et d'un micro-fossile (radiolaire) sur des échantillons de roche prélevés à 11 m et 11.7 m dans le sondage SC02 et décrits comme du calcaire altéré marneux (voir Figure 1.12). La Figure 1.13 montre une intensité élevée des éléments chimiques Mg-Si-Al dans la matrice calcaire autour de la micro-fissure et du micro-fossile. Ces éléments chimiques sont les principaux composants des phyllosilicates ou feuillets argileux. Cette analyse d'échantillons montre que l'altération de la matrice calcaire est associée à un remplacement argileux autour des figures d'altération comme les fissures.

En plus d'une analyse lithologique, (Aldana, 2019) a fait des mesures de teneur en eau à saturation, de conductivité hydraulique à saturation à la presse hydraulique et de porosité sur des échantillons de roche extraits du sondage SC02. Le Tableau 1.1 présente les valeurs mesurées pour les échantillons de roches prélevés entre 7 m et 17 m de profondeur.

Faciès	Profondeur	Caractéristiques	σ_c (kPa)	Θ_{sat} (cm ³ /cm ³)	K_{sat} (cm/j)	ϕ_{Tot} (%)	Φ_c (%)	CV (%)
Roche	7.45-7.55 m	Vacuoles-Fissures	124	0.14	8.54E-4	11.9	9.6	77.88
Roche	13.2-13.3 m	Vacuoles	241	0.15	2.83E-2	14.4	12.0	6.21
Roche	14.59-14.68 m	Vacuoles	269.5	0.14	1.00E-1	8.9	5.8	16.39
Roche	16.1-16.2 m	Vacuoles	300	0.16	1.40E-1	15.2	10.4	12.38

Tableau 1.1: Valeurs de teneur en eau à saturation (Θ_{sat}), de conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) et de porosité totale (ϕ_{Tot}) et connectée (Φ_c) mesurées sur des échantillons de roche prélevés dans le sondage SC02 à la presse hydraulique par (Aldana, 2019). CV est le coefficient de variation lié à l'erreur de mesure pour chaque essai.

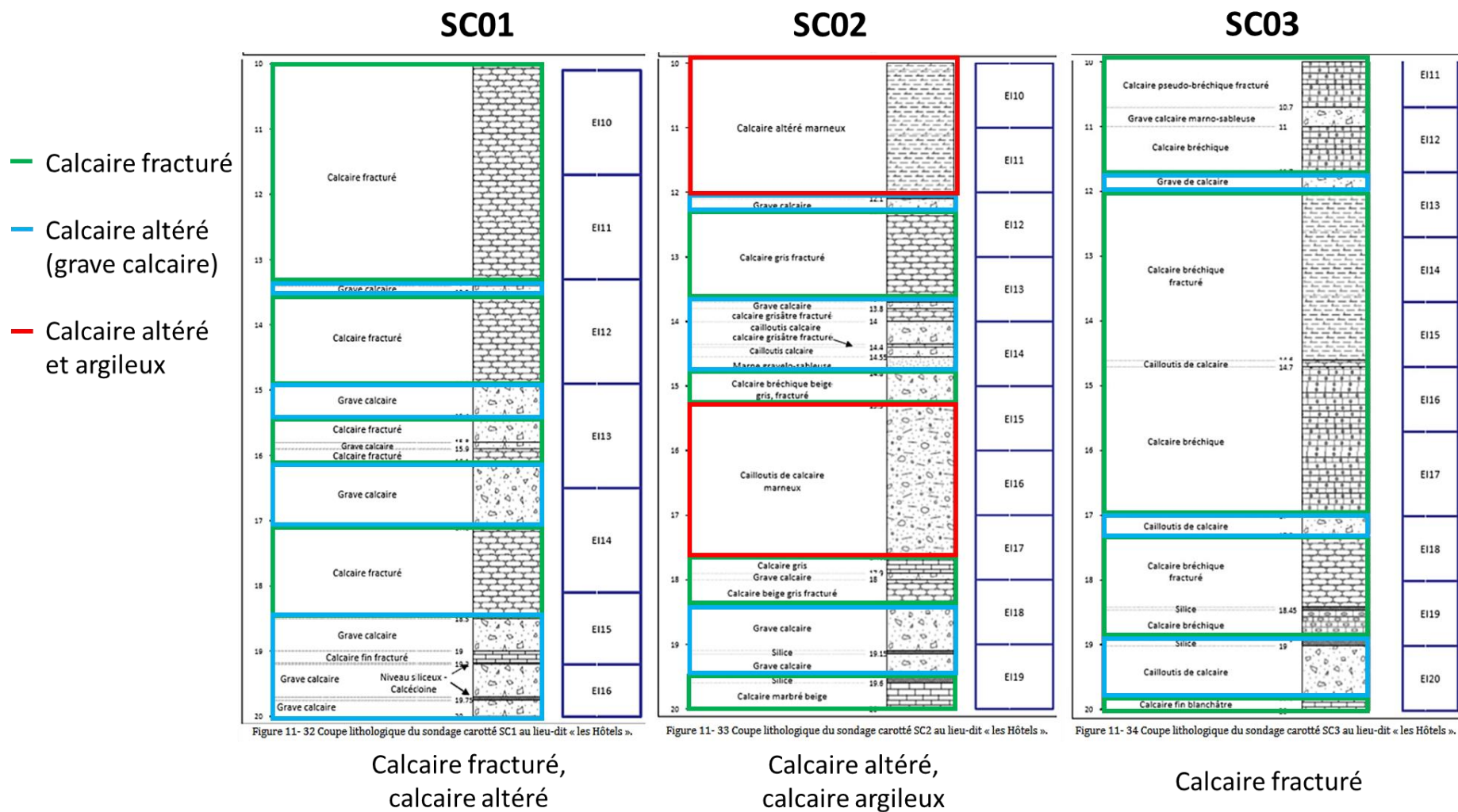


Figure 1.12: Description lithologique des sondages SC01-SC03 faite par (Aldana, 2019) et réinterprétée en catégories d'altération.

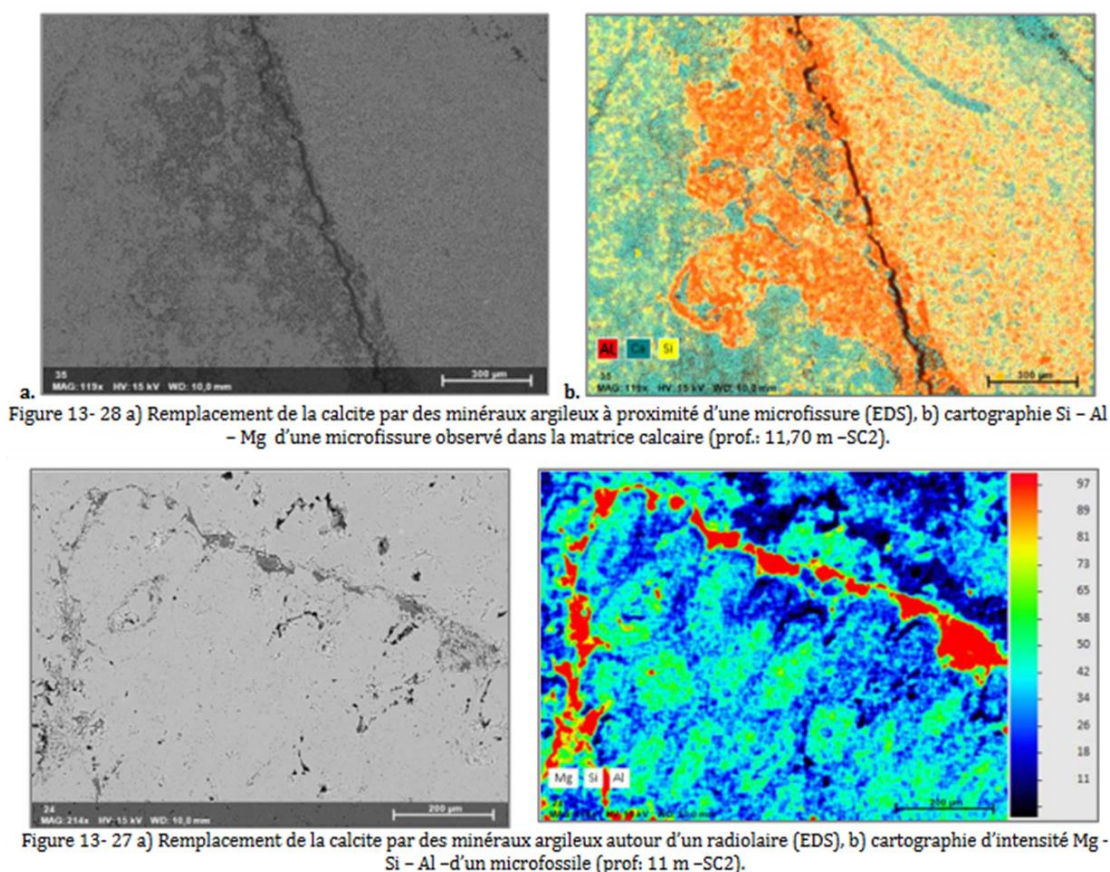


Figure 1.13: Observation sur lame mince et analyse chimique d'une micro-fissure (haut) et d'un micro-fossile (bas) sur des échantillons de roches prélevés dans le sondage SC02 à 11.7 m et 11m de profondeur (Aldana, 2019).

D'après le Tableau 1.1, les échantillons de roches ont une teneur en eau à saturation homogène comprise entre 0.14 et 0.16 cm³/cm³. Cependant, les valeurs de conductivité hydraulique à saturation sont très variables avec un facteur 100 entre la valeur la plus faible (8.54×10^{-4} cm/j), mesurée pour l'échantillon prélevé à 7.45-7.55 m et la valeur la plus élevée (0.14 cm/j), mesurée pour l'échantillon prélevé à 16.1-16.2 m. L'échantillon prélevé à 7.45-7.55 m présente un remplacement de la matrice calcaire par des phyllosilicates, des vacuoles millimétriques et une fissure de quelques centimètres de long. L'échantillon prélevé à 16.1-16.2 m présente une densité de vacuoles importante.

Les campagnes de mesures géophysiques menées en 2018 et 2019 avaient pour objectif d'étendre la description lithologique faite sur échantillon, à l'échelle du site. La Figure 1.14 présente les profils ERT de 2018 couplés à la lithologie de forage. Les profils interprétés permettent (1) de retrouver les trois zones définies lors de la description lithologique du site avec la couche de sol conductrice ($\approx 60 \Omega.m.$) de 0 à 3 m, la couche de marnes argileuses entrecoupée de calcaire massif présentée comme une couche de résistance moyenne ($\approx 160 \Omega.m.$) avec des anomalies conductrices ($\approx 80 \Omega.m.$) correspondant à des lentilles argileuses. Ces caractéristiques sont également retrouvées sur les profils ERT de 2019 présentés dans la Figure 1.15 couplés à la lithologie, la résistivité électrique et la permittivité diélectrique mesurée en forage par géo-radar (GPR).

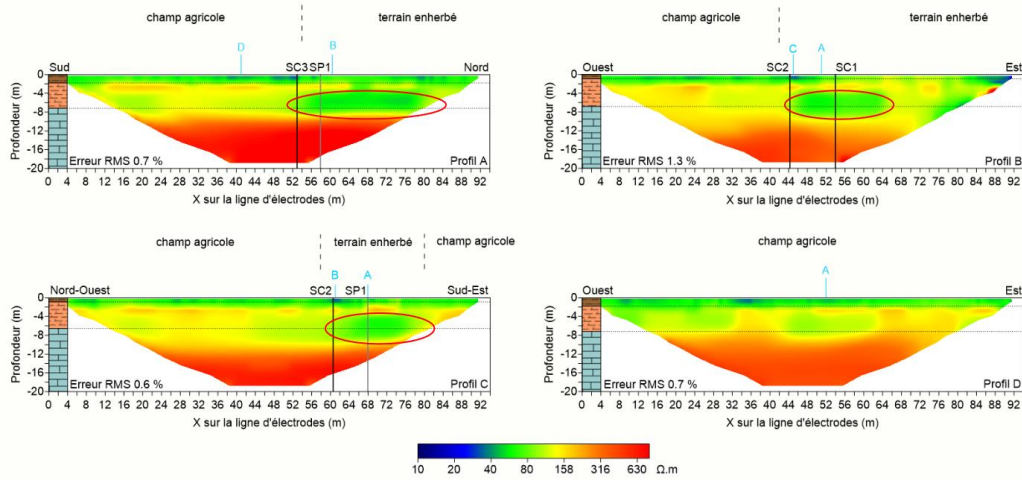


Figure 1.14: Profils ERT de 2018 sur le site O-ZNS couplés à la lithologie de forage. Modifié de (Jodry et al., 2018).

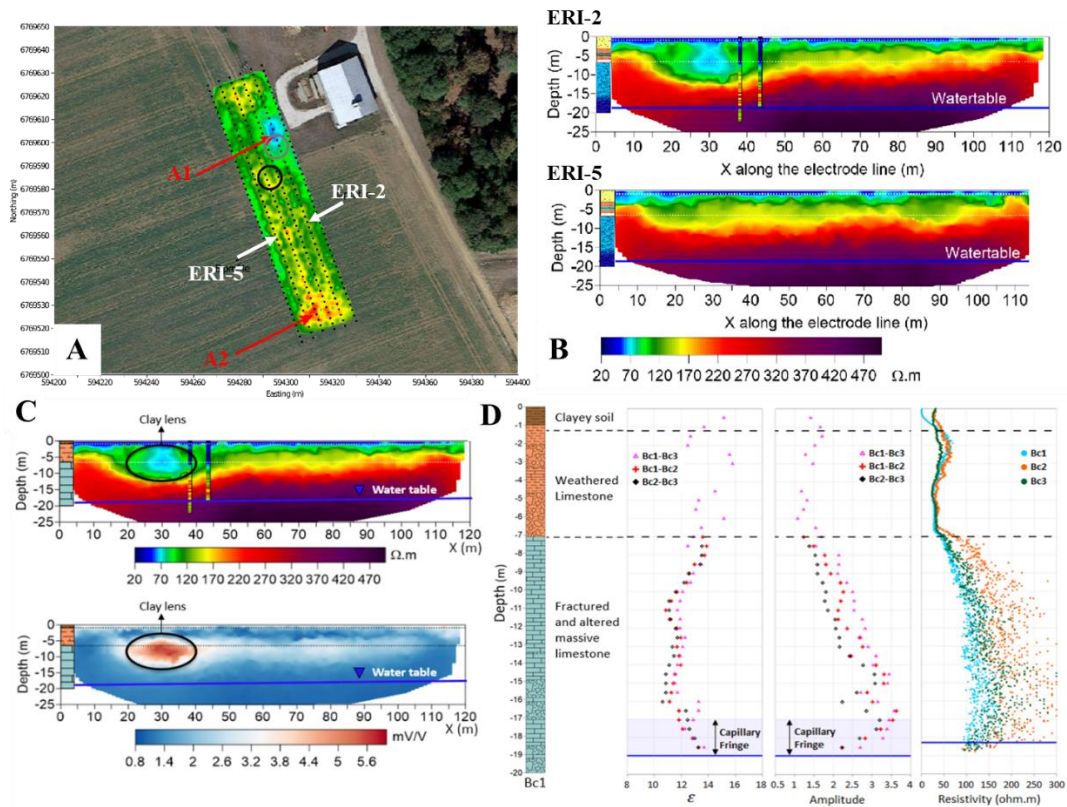


Figure 1.15: (A) Cartographie ERI de 2019 à 2 m de profondeur, (B) Profils ERT de 2019 correspondant à la carte ERI, (C) Profil ERT et PP correspondants à la carte ERI, (D) lithologie, permittivité diélectrique, amplitude GPR et résistivité électrique de forage (Abbas et al., 2021; Céline Mallet et al., 2022).

Sur la Figure 1.15.A, deux anomalies sont distinguées sur la carte ERI, la A1 plus conductrice et la A2 plus résistante. Celles-ci sont interprétées comme du calcaire altéré avec respectivement une teneur élevée et faible en argile. L'anomalie A1 est visible sur le profil ERI-2 des Figure 1.15.B et Figure 1.15.C comme une anomalie conductrice et hautement chargeable correspondant à une lentille d'argile (Abbas et al., 2021; Céline Mallet et al., 2022). Sur la Figure 1.15.D, les délimitations de couches lithologiques décrites précédemment sont clairement corrélées avec les données de forage.

De plus, la dispersion des valeurs de permittivité diélectrique et conductivité électrique dans le calcaire fracturé et altéré traduit l'hétérogénéité et la variabilité de cette couche. La Figure 1.16 présente les deux profils sismiques de 2018 corrélés à la lithologie de forage. Ces profils permettent de retrouver les trois couches lithologiques : le sol, le calcaire hétérogène, altéré et plus ou moins argileux et le calcaire massif fracturé en profondeur.

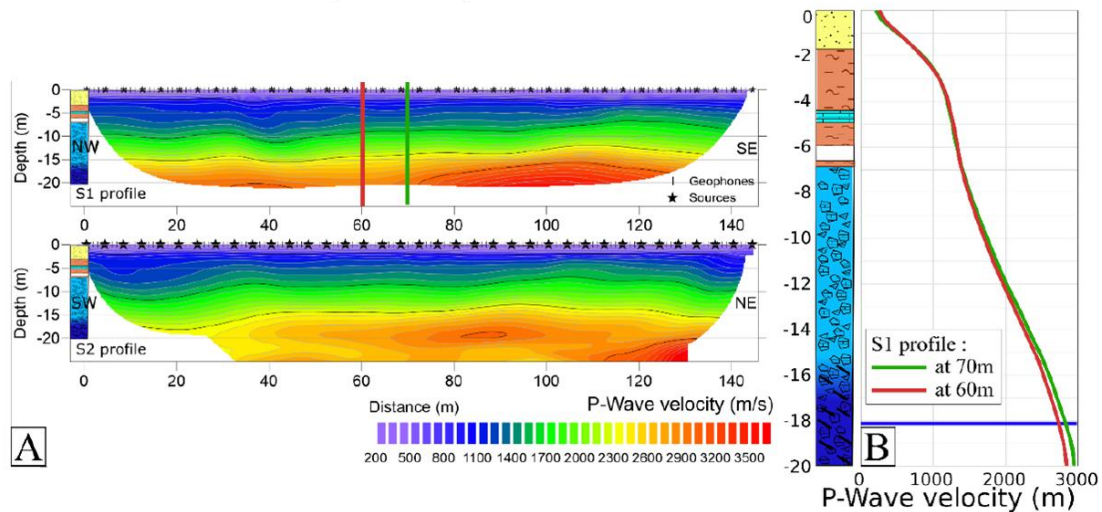


Figure 1.16: (A) Profils sismiques S1 et S2 de 2018, (B) corrélation avec la lithologie de forage (Céline Mallet et al., 2022).

1.2.2 Suivi dynamique de la ZNS sur le site Grand Bois : synthèse des études précédentes

(Legchenko et al., 2022) a fait un suivi temporel de la ZNS avec un monitoring SNMR d'un an à pas de temps mensuel en 1999-2000 puis en 2020-2021. L'objectif était de faire un suivi de la ZNS par un monitoring de la teneur en eau mesurée par SNMR. Le contexte hydrogéologique des deux périodes est différent. D'après la Figure 1.10, la période 1999-2000 se situe dans une phase d'augmentation du niveau piézométrique lors de la recharge hivernale. La période 2020-2021 ne présente pas de recharge. La Figure 1.17 présente les résultats des monitorings de teneur en eau SNMR de 1999-2000 et 2020-2021.

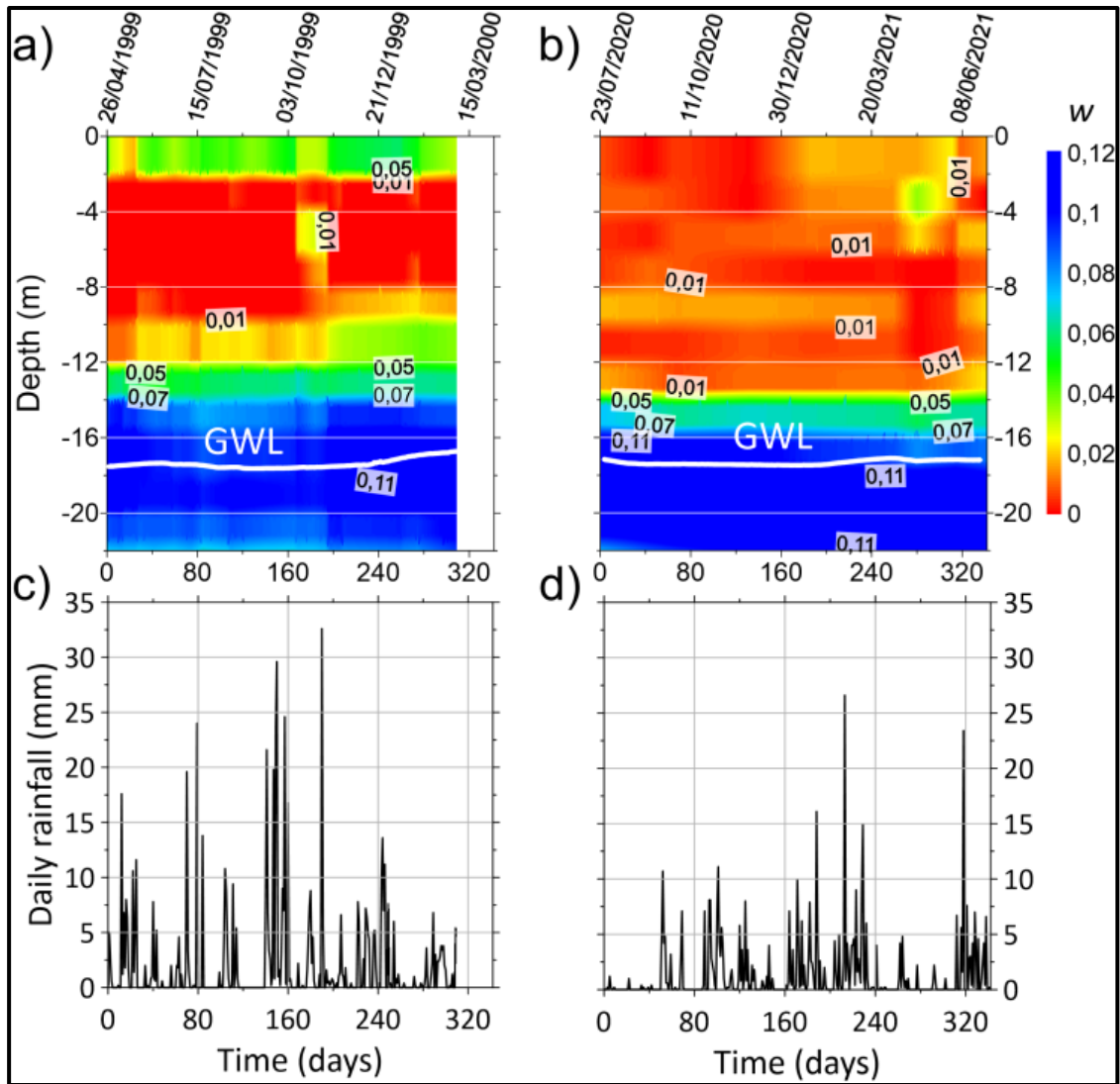


Figure 1.17: Teneur en eau SNMR (échelle de couleur) issue de l'inversion time-lapse des sondages SNMR lors des monitorings de (A) 1999-2000, (B) 2020-2021 jusqu'à une profondeur de 22 m. Suivi de la pluie journalière sur la même période pour (C) 1999-2000 et (D) 2020-2021. (Legchenko et al., 2022).

D'après la Figure 1.17, le monitoring SNMR de 1999-2000 permet d'identifier plusieurs couches : une couche de 0 à 2 m de profondeur avec une teneur en eau de 0.05, une couche de 2 à 12 m de profondeur avec une teneur en eau à 0.00-0.02 et une couche de 12 à 22 m de profondeur avec une teneur en eau augmentant graduellement jusqu'à 0.11 à partir de 12 m. De plus, il y a une augmentation de la saturation jusqu'à 12 m à partir de novembre jusqu'en juin soit pendant la période de recharge. Le monitoring SNMR de 2020-2021 présente une lame d'eau plus faible qu'en 1999-2000, ce qui est cohérent avec le contexte hydrométéorologique. En reprenant les couches précédemment définies, la couche de 0-2 m est désaturée avec une teneur en eau à 0.00-0.02 et l'ensemble des autres couches sont désaturées jusqu'à 14 m. L'augmentation graduelle de la saturation intervient à partir de 14 m. Le monitoring de 1999-2000 montre une augmentation progressive temporelle de la teneur en eau à partir de novembre 1999 jusqu'à 10 m. Pour confirmer que cette évolution de teneur en eau est représentative de la saturation de la ZNS par la recharge, la Figure 1.18 montre l'évolution de la pluie cumulée, de la colonne d'eau SNMR et du niveau piézométrique en 1999-2000.

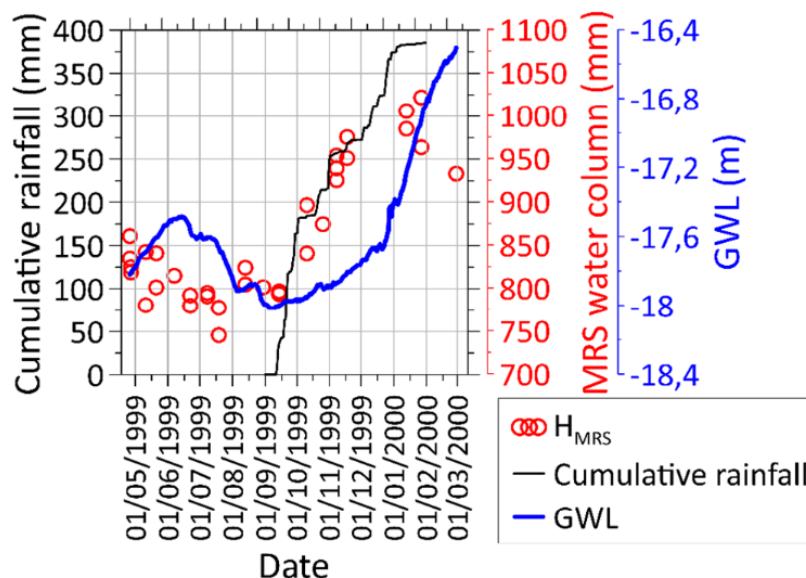


Figure 1.18: Variation temporelle de la colonne d'eau SNMR (rouge), la pluie cumulée (noir) et du niveau piézométrique (bleu) sur le site Grand Bois en 1999-2000 (Legchenko et al., 2022).

La Figure 1.18 montre que la variation temporelle de la colonne d'eau SNMR suit la variation temporelle de la pluie cumulée. La colonne d'eau SNMR représente alors l'accumulation de la pluie lors de la saturation temporaire de la ZNS pendant l'infiltration de l'eau vers la nappe. De plus, on observe un délai de trois mois entre l'augmentation de la colonne d'eau SNMR et l'augmentation du niveau piézométrique, délai qui correspond au temps de transfert de l'eau dans la zone non saturée. Sur la Figure 1.17, on n'observe pas de variation temporelle de la teneur en eau lors du monitoring 2020-2021 ce qui est cohérent avec les conditions hydrométéorologiques ne présentant pas de recharge lors de cette période.

(Legchenko et al., 2020) a proposé un nouveau schéma d'inversion jointe teneur en eau SNMR-Hydrus. Les teneurs en eau du modèle Hydrus, calculées à partir des paramètres hydrauliques d'un modèle simplifié à 4 couches, sont contraintes par les teneurs en eau SNMR mesurées et inversées en time-lapse. Ce schéma d'inversion jointe a ainsi permis de construire un modèle d'écoulements hydriques non saturés Hydrus du site GB à partir des teneurs en eau SNMR inversées en time-lapse sur l'année 1999-2000 présentant une recharge importante. Ce résultat est une première approche pour améliorer la modélisation des écoulements de la ZNS avec une contrainte sur les teneurs en eau en fonction du temps et de la profondeur, calées à partir d'un suivi temporel de la teneur en eau mesurée par SNMR. Cette approche et la cohérence des paramètres hydrauliques résultants de l'inversion doivent être vérifiés à partir d'autres données de monitoring.

1.2.3 Estimation des temps de transferts dans les calcaires de Beauce avec la géophysique et la modélisation hydrogéologique

Plusieurs valeurs de temps de transfert dans la ZNS existent sur Villamblain sur la base de mesures expérimentales ou de modélisations hydrogéologiques à différentes échelles. Quelques exemples sont présentés ici pour illustrer la variabilité des temps de transferts existants dans la ZNS de l'Aquifère de Beauce et à Villamblain.

(Legchenko et al., 2020) a couplé un suivi temporel de la teneur en eau SNMR à fréquence mensuelle pendant une année à l'échelle multi-décamétrique sur le site Grand Bois avec un modèle d'écoulement vertical Hydrus1D dans la ZNS résolvant numériquement l'équation de Richard avec le modèle Kosugi. Il a montré à partir de ce couplage que la colonne d'eau SNMR augmente de façon cohérente avec l'augmentation du cumul de pluie efficace et avec un délai de **3 mois** avant l'augmentation du niveau piézométrique.

(Flipo et al., 2012; Monteil, 2011) ont développé un modèle régional de l'Aquifère de Beauce avec pour objectif de modéliser la recharge et le bilan de masse de l'aquifère. Le modèle est construit sur 3 compartiments : la surface (conceptuel), la zone non saturée (conceptuel) et la zone saturée (physique). Le compartiment de surface résout pour chaque maille une des 12 fonctions de production définies à partir du type et de l'utilisation des sols. Ce module permet de calculer le bilan hydro-climatique de surface et la masse d'eau qui infiltrera le compartiment zone non saturée (ZNS). Le compartiment ZNS est monocouche et représenté par une cascade de réservoirs de Nash c'est-à-dire une cascade de réservoirs dont la loi de vidange de l'un à l'autre est exponentielle. Le troisième compartiment de la zone saturée résout l'équation de diffusivité et est modélisée par une unique couche de calcaire avec des paramètres hydrodynamiques spatialement variables représentant les Calcaires de Beauce. Sur la maille de Villamblain (dizaine de km²), le temps de transfert dans la ZNS est calculé à **25 jours**.

Ces deux valeurs correspondent aux temps de réaction de la nappe à la recharge dans le cycle annuel de recharge et est cohérent avec les ordres de grandeur de temps de transfert dans la porosité de fracture. (Schnebelen, 2000) a estimé celui-ci à partir d'essais de pompage **entre 15 et 45 jours pour les années normales et entre 2 et 3 mois pour les années sèches**, ce qui est du même ordre de grandeurs que les valeurs précédemment présentées.

A partir de mesures des courbes de rétention et de conductivité hydraulique en fonction de la saturation réalisées par (Aldana, 2019) en laboratoire sur les échantillons de sols et de roche des forages SC01-2-3, (Aldana et al., 2021) et (Isch et al., 2022) ont construit un modèle Hydrus de flux 1D dans la ZNS résolvant numériquement l'équation de Richard avec respectivement les modèles MVG (simple porosité) et DBM (double porosité). Les modèles Hydrus respectifs sont comparés avec les teneurs en eau également mesurées au laboratoire sur ces échantillons par (Aldana, 2019). Ces deux modèles calculent un temps de transfert dans la ZNS de **30 ans**. Ce temps de transfert est cohérent avec les ordres de grandeur de temps de transfert dans la matrice calcaire suivant un cycle pluriannuel de recharge.

Chapitre 1.3 : Synthèse

L'Aquifère de Beauce est située dans une région avec des enjeux importants sur la ressource en eau. L'exploitation de la nappe phréatique à la fois pour l'agriculture, l'eau potable et l'industrie amène à des conflits d'usage nécessitant de réglementer les prélèvements. De plus, cet aquifère multicouche calcaire n'est pas protégé par une couche imperméable sur une grande partie de sa surface ce qui rend la nappe vulnérable à l'infiltration des polluants et fait d'elle l'une des nappes les plus polluées aux nitrates en France. Ces deux enjeux rendent nécessaire la compréhension du comportement de la zone non saturée et de l'infiltration de l'eau jusqu'à la nappe. L'Aquifère de Beauce est un aquifère multicouche de calcaires intercalés avec des couches marneuses ou argileuses. La zone d'étude de Villamblain, située à l'ouest de l'Aquifère de Beauce est composée de deux sites :

(1) le site O-ZNS, observatoire composé d'un puit de 4 m de diamètre et 20 m de profondeur, entouré de huit forages, le tout instrumenté pour étudier la zone non saturée. Ce site a fait l'objet d'études géologiques et géophysiques afin de caractériser la lithologie avant le creusement du puit. Les études lithologiques et hydrauliques réalisées sur des échantillons au laboratoire ont montrées d'une part une hétérogénéité importante des calcaires avec des niveaux variables d'altération notamment de la matrice calcaire par des remplacements argileux. D'autre part, cette variabilité des calcaires se traduit par une variabilité importante de la conductivité hydraulique pour une même teneur en eau à saturation des échantillons de calcaire. Sur le terrain, cette variabilité lithologique se traduit par une variabilité des valeurs de résistivité électrique et de permittivité diélectrique en forage (échelle décimétrique) et par la présence d'une lentille argileuse dans les calcaires tabulaires à échelle décamétrique. Il manque cependant une caractérisation hydraulique à échelle décamétrique qui soit cohérente avec les résultats lithologiques à l'échelle décamétrique et doit être comparée avec les résultats hydrauliques à l'échelle centimétrique. Cette caractérisation hydraulique à l'échelle décamétrique permettra d'avoir une description hydrogéologique tenant compte de l'hétérogénéité du terrain à intégrer en modélisation.

(2) le site Grand Bois, champ cultivé où ont été menés deux monitorings de teneur en eau SNMR en 1999-2000 et en 2020-2021 pour suivre la dynamique de la ZNS pendant une année hydrologique. Le monitoring de 1999-2000, période pendant laquelle la recharge fut importante, a montré que la méthode SNMR peut suivre les variations de teneur en eau dans la ZNS en fonction des variations saisonnières de pluviométrie et également que lors d'une recharge importante, l'augmentation de la colonne d'eau SNMR dans la ZNS est cohérente avec la recharge de la ZNS avec un délai de trois mois précédent l'augmentation du niveau piézométrique.

Les valeurs de temps de transfert dans la ZNS à l'échelle de l'aquifère de Beauce et sur le site de Villamblain estimées sur la base de mesures expérimentales ou de modélisations hydrogéologiques sont variables selon l'échelle regardée, en effet: (1) le cycle saisonnier de recharge, avec un temps de transfert estimé entre 15 jours et 45 jours voir 2 à 3 mois (Schnebelen, 2000), estimé et modélisé sur la base d'un suivi SNMR à 3 mois (Legchenko et al., 2020) et simulé avec un modèle de bilan de masse à 25 jours (Flipo et al., 2012; Monteil, 2011). (2) le cycle pluriannuel de recharge de la matrice calcaire, avec un temps de transfert estimé à 30 ans avec un modèle d'écoulements non saturés sur la base de propriétés pétro-physiques établies sur échantillons (Aldana et al., 2021; Isch et al., 2022).

Partie 2 : Rappels théoriques et état de l'art

Chapitre 2.1 : Hydrogéologie en zone non saturée

2.1.1 Écoulements saturés et non saturés

La zone saturée correspond à la zone située sous le niveau piézométrique. Cela signifie qu'à ces profondeurs le milieu est saturé en eau, donc constitué de solide (sol, roche) et de liquide (eau). Les écoulements hydriques sont décrits par la loi de Darcy (Equation 1.1) (Darcy, 1856):

$$q = K * \frac{\Delta h}{L} \quad (1.1)$$

avec q la vitesse de Darcy (m/s), K la conductivité hydraulique à saturation ou coefficient de perméabilité (m/s), Δh le gradient de charge hydraulique (m) et L la longueur (m). Cela correspond à la vitesse d'un écoulement uniforme en milieu saturé déduite du débit d'écoulement à travers la section totale de l'aquifère (Castany, 1998).

Les principaux paramètres utilisés pour décrire la zone saturée d'un aquifère sont : la charge hydraulique (mesurée par le niveau piézométrique), la teneur en eau, la transmissivité (Equation 1.2), l'épaisseur, la conductivité hydraulique à saturation. Ces paramètres permettent de décrire la géométrie de l'aquifère et ses propriétés hydrodynamiques.

$$T = K * \Delta z \quad (1.2)$$

avec T la transmissivité (m²/s), et Δz l'épaisseur mouillée de l'aquifère (m).

La zone non saturée correspond à la zone entre la surface et le niveau piézométrique. A ces profondeurs le milieu est constitué de solide (sol, roche), de liquide (eau) et de gaz (air). Le milieu étant à saturation variable, la pression est également variable sur la colonne et les propriétés d'écoulement et de rétention d'eau dépendent de celle-ci, de la porosité et des caractéristiques lithologiques du milieu. Différents types d'eau peuvent être définis en fonction de leur comportement et écoulement dans l'aquifère (Figure 2.1) (Lubczynski and Roy, 2005):

Dans la zone saturée :

- **L'eau mobile** représente l'eau qui contribue à l'écoulement. La teneur en eau mobile correspond à la **porosité cinématique saturée n_e** .
- **L'eau « dead-end » et non connectée** ne contribue pas à l'écoulement. Cette eau se trouve dans les fractures non connectées et les micro-joints sans issue, mais aussi les cavités karstiques et vacuoles calcaires isolées qui ne contribuent pas à l'écoulement. La teneur en eau « dead-end » correspond à la **porosité piégée n_t** et est abondante dans les aquifères karstiques.
- **L'eau liée ou immobile** correspond à l'eau immobile qui ne contribue pas à l'écoulement.

Dans la zone non saturée :

- **L'eau gravitaire** correspond à l'eau mobile qui s'écoule des roches par gravité. La teneur en eau gravitaire est mesurée par le paramètre « **specific yield** » S_y , c'est-à-dire l'eau drainée par gravité lors d'un essai de pompage.
- **L'eau capillaire ou eau de rétention mobile** correspond à l'eau retenue par la tension de surface entre la roche, l'eau et l'air dans la zone non saturée. Les forces de rétention sont plus élevées pour les roches à granulométrie fine avec des petites tailles de pores que pour les roches à granulométrie grossière avec de grandes tailles de pores.
- **L'eau « dead-end » et non connectée**, présente en plus faible quantité dans la zone non saturée, est composée uniquement de l'eau non connectée.
- **L'eau liée ou immobile** correspond à l'eau immobile qui ne contribue pas à l'écoulement et ne sort pas de la zone non saturée.
- **Le paramètre « specific retention »** S_r , est l'ensemble du volume d'eau retenue contre les forces de gravité. Cela correspond à la teneur en eau capillaire, dead-end et liée. La somme de S_r et S_y correspond à la porosité totale.

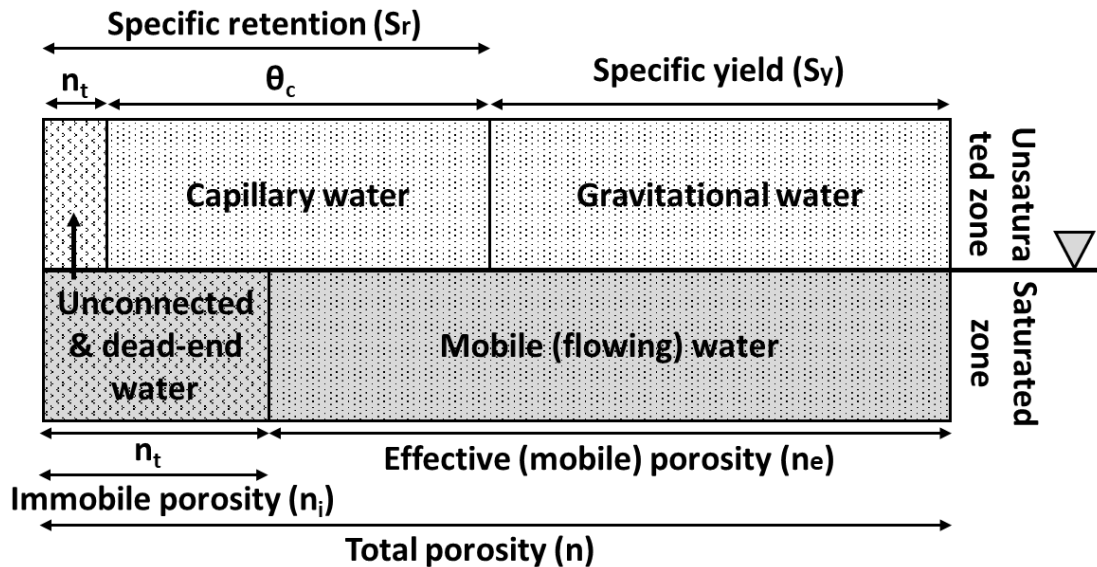


Figure 2.1 : Modèle conceptuel de porosité modifié du modèle défini par (Lubczynski and Roy, 2005) dans l'aquifère et la zone non saturée.

La saturation et la pression étant variables dans la zone non saturée, les propriétés hydrauliques telles que la teneur en eau et la conductivité hydraulique sont également dépendantes de la pression. La relation entre ces variables est définie par l'équation de Richard (Equation 1.3 , pour un écoulement 1D vertical) (Richards, 1931):

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) \right] \quad (1.3)$$

avec θ la teneur en eau (-), h le potentiel matriciel négatif (m) et K la conductivité hydraulique (m/s).

2.1.2 Simulation numérique des écoulements non saturés

Les relations teneur en eau / pression et conductivité hydraulique / pression sont décrites respectivement par des lois de rétention et des lois de perméabilité. Ces lois (appelées aussi modèles) sont utilisés pour résoudre numériquement l'équation de Richard. Cette sous-partie présente quelques modèles numériques de résolution de l'équation de Richard utilisés dans des modèles d'écoulement dans la zone non saturée développés sur le site de Villamblain. Le modèle Mualem-Van-Genuchten (MVG) décrit la courbe de rétention et la connectivité statistiques des pores pour prédire la conductivité hydraulique (Equations 1.4 et 1.5), (Mualem, 1976; van Genuchten, 1980):

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \text{ avec } m = 1 - \frac{1}{n} \quad n > 1 \quad (1.4)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \text{ avec } S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (1.5)$$

θ_r et θ_s sont les teneurs en eau volumiques respectivement résiduelles et à saturation (cm^3/cm^3), α un paramètre empirique (-), n un paramètre de distribution de taille de pores (-), K_s la conductivité hydraulique à saturation (m/s), S_e la saturation efficace (-) et l un paramètre de connectivité des pores (-) fixé à 0.5. Le modèle Kosugi utilise une distribution logarithmique de taille des pores et résout également la conductivité hydraulique définie par Mualem (Equations 1.6 et 1.7), (Kosugi, 1994) :

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln(h/h_0)}{\sqrt{2}\sigma} \right] & (h < 0) \\ 1, & (h \geq 0) \end{cases} \quad (1.6)$$

$$K(h) = \begin{cases} K_s S_e^l \left[\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln(h/h_0)}{\sqrt{2}\sigma} + \frac{\sigma}{\sqrt{2}} \right] \right]^2 & (h < 0) \\ K_s, & (h \geq 0) \end{cases} \quad (1.7)$$

avec erfc la fonction d'erreur complémentaire, σ l'écart-type de la fonction log.

Ces deux modèles considèrent une seule distribution de taille de pores. D'autres modèles plus complexes comme le modèle bimodal de Durner (DBM) correspondant à un modèle unimodal MVG étendu pour une double porosité (Equation 1.8 et 1.9), (Durner, 1994).

$$S_e = w_1 [1 + (\alpha_1 h)^{n_1}]^{-m_1} + w_2 [1 + (\alpha_2 h)^{n_2}]^{-m_2} \quad (1.8)$$

$$K(S_e) = \frac{(w_1 S_{e1} + w_2 S_{e2})^l \left(w_1 \alpha_1 \left[1 - (1 - S_{e1}^{1/m_1})^{m_1} \right] + w_2 \alpha_2 \left[1 - (1 - S_{e2}^{1/m_2})^{m_2} \right] \right)^2}{(w_1 \alpha_1 + w_2 \alpha_2)^2} \quad (1.9)$$

avec α_1 , α_2 , n_1 et n_2 les paramètres définis précédemment mais pour les deux régions, w_1 et w_2 les facteurs de pondération des deux régions porales.

Chapitre 2.2 : Méthodes géophysiques

2.2.1 Méthodes basées sur le phénomène NMR

Théorie de la Résonance Magnétique Nucléaire (NMR)

La méthode de la Résonance Magnétique Nucléaire (NMR) repose sur les propriétés des spins de protons contenus dans l'eau. Ces spins possèdent un moment angulaire et un moment magnétique. Lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique statique B_0 , ces spins sont en précession dans la direction de ce champ et à la fréquence de Larmor, proportionnelle à l'intensité du champ magnétique et sont à l'équilibre thermodynamique. Lorsqu'un champ électromagnétique externe B_1 est injecté à la fréquence de Larmor et dans une direction différente du champ initial, l'énergie dégagée est absorbée par les spins et ils sont réorientés dans la direction du nouveau champ. L'orientation dans la même direction des moments magnétiques de tous les spins induit un champ magnétique M dont l'intensité est proportionnelle à la quantité de spins orientés dans la même direction. Lors de l'arrêt d'injection de B_1 , les spins aimantés relâchent l'énergie absorbée et retournent à l'équilibre thermodynamique avec un temps de relaxation qui peut être calculé selon les équations (1.1) et (1.2) de Bloch (Behroozmand et al., 2015) :

$$E_{xy}(t) = E_0 \sum_i f_{2i} e^{-\frac{t}{T_{2i}}} \quad (1.1)$$

$$E_z(t) = E_0 (1 - \sum_i f_{1i} e^{-\frac{t}{T_{1i}}}) \quad (1.2)$$

Avec $E_{xy}(t)$ et $E_z(t)$ les amplitudes respectivement transverses et longitudinales du signal NMR, E_0 l'amplitude à l'origine du signal NMR proportionnelle à la quantité de protons par volume d'eau qui ont résonnés, f_{2i} et f_{1i} respectivement les proportions du champ M qui ont résonnées pendant un temps caractérisé par les constantes T_{2i} et T_{1i} dans les directions transverses et longitudinales.

Le temps de relaxation caractérise le phénomène de retour des spins magnétisés à leur état d'équilibre initial : il a une décroissance exponentielle. Le paramètre mesuré est la constante de temps de relaxation de l'exponentielle décroissante (équations (1.1) et (1.2)). Plus le couplage entre les spins et le milieu environnant est faible (taille de pore élevée) et plus le temps de relaxation est long, au contraire plus le couplage entre les spins et le milieu environnant est élevé (taille de pore faible) et plus le temps de relaxation sera court.

Il existe plusieurs constantes de temps de relaxation : T_1 , T_2 et T_2^* (Legtchenko, 2013).

- T_1 est la constante de temps de relaxation longitudinale. Elle caractérise le temps de décroissance exponentiel du champ M produit par l'alignement des spins magnétisés.
- T_2 est la constante de temps de relaxation transverse. A l'état d'équilibre initial, il n'y a pas de cohérence de phase entre les spins. Lorsque ceux-ci sont magnétisés, cela induit un champ M et une cohérence de phase dont la projection dans la direction transverse produit une composante $M_{\perp}$ non nulle. Les échanges d'énergie entre les spins et avec l'environnement produisent une perte de la phase et une décroissance exponentielle de

$M_{\perp}$ avec un temps de décroissance T_2 . A terme, alors que le déphasage augmente, le signal SNMR n'est plus mesurable mais le phénomène de retour à l'équilibre thermodynamique des spins continue selon la constante de temps T_1 , donc $T_2 \leq T_1$.

- T_2^* est la constante de temps de relaxation transverse sensible à l'hétérogénéité magnétique du milieu. Lorsque le milieu est hétérogène magnétiquement, les protons ne vont pas tous résonner à la même fréquence ce qui va augmenter la perte de cohérence de phase avec un temps de décroissance T_2^* avec $T_2^* \leq T_2 \leq T_1$.

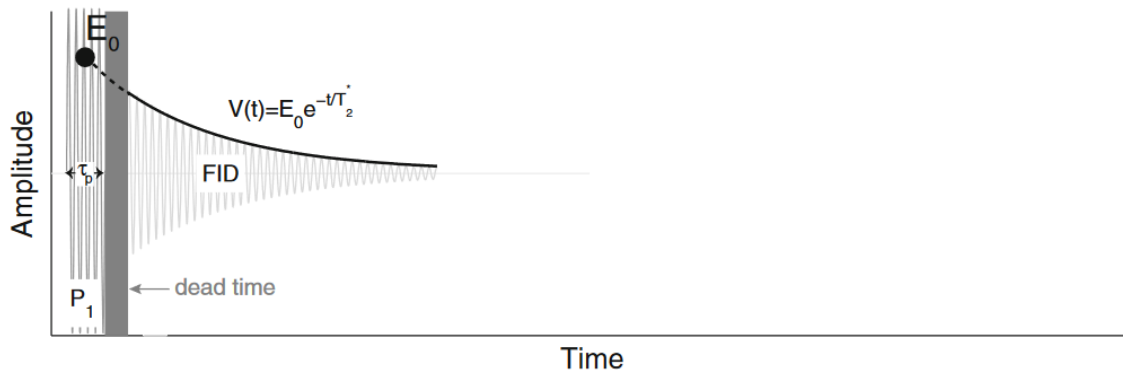
L'expérience présentée pour décrire le phénomène NMR correspond à la décroissance d'induction libre (Free Induction Decay ou FID) lorsque le champ est injecté pendant τ_p à un angle de 90° par rapport à la direction du champ statique initial (Figure 2.2.A). Le « dead time » correspond au temps nécessaire pour atténuer le champ électromagnétique injecté et ses effets inductifs associés ne permettant pas de mesurer le signal NMR. De plus, le FID est sensible aux hétérogénéités magnétiques du milieu à grande échelle (anomalies magnétiques) comme à petite échelle (variation de susceptibilité magnétique à l'échelle porale entre l'eau et la roche). Ces hétérogénéités magnétiques accélèrent la perte de cohérence du signal transverse T_2 qui est plus court, dénommé T_2^* présenté précédemment. La relation entre les deux paramètres peut être définie selon l'équation (1.3) :

$$\frac{1}{T_2^*} = \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_{2IH}} \quad (1.3)$$

Avec $\frac{1}{T_{2IH}}$ le terme correspondant aux hétérogénéités magnétiques du milieu.

Pour atténuer ou compenser l'influence des hétérogénéités magnétiques, il existe une autre séquence de mesure : le CPMG « CarrPurcell–Meiboom–Gill ». Cette séquence consiste en une mesure FID à 90° du champ initial + N spin echo à 180° (Figure 2.2.B). Lorsque les spins ne sont plus en cohérence de phase (FID nul), la constante de temps de relaxation transverse ne peut plus être mesurée mais les spins ne sont pas tous de retour à l'équilibre dans la direction longitudinale. Les spins à fréquence plus élevée et plus faible retournent à l'équilibre avec des angles opposés à la direction transverse dans le plan transverse, le spin echo (SE) consiste à orienter l'ensemble des spins non relaxés à 180° dans ce plan permettant de changer la direction de rotation d'angle et de les recentrer. La proportion de spins non relaxés diminue avec le temps et la décroissance d'amplitude des SE dans la séquence CPMG permet de mesure T_2 (Figure 2.2.B) (Behroozmand et al., 2015; Legtchenko, 2013).

(a) FID pulse sequence



(b) CPMG pulse sequence

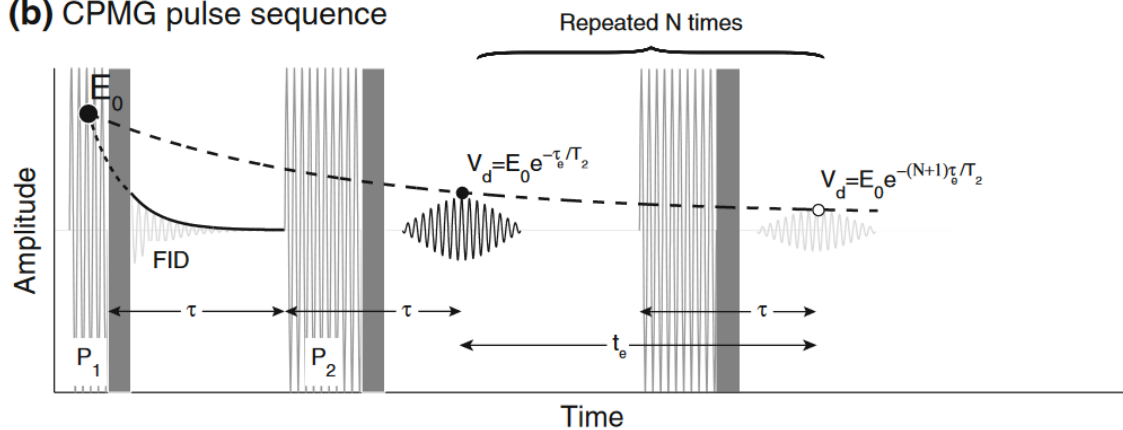


Figure 2.2 : Séquences de mesures NMR : (A) FID et (B) CPMG. Extrait de (Behroozmand et al., 2015).

La mesure NMR en géophysique peut être faite à plusieurs échelles : à l'échelle centimétrique au laboratoire (Lab-NMR), à l'échelle décimétrique en forage (BNMR) ou à, l'échelle (multi)-décamétrique en surface (SNMR). Nous nous concentrons ici sur la mesure NMR en surface (SNMR) et en forage (BNMR).

Les deux mesures NMR, basées sur le même principe, diffèrent selon plusieurs paramètres lors de la mesure :

- Le volume exploré
- Le champ magnétique injecté
- La séquence de mesure utilisée
- Le temps de relaxation transverse mesuré
- Les données mesurées

Mesures NMR en forage (BNMR)

La mesure BNMR est faite avec une sonde et explore un volume centimétrique autour de la sonde de mesure. Les champs magnétiques injectés ont une intensité de 5.75 à 47 mT soit une fréquence de Larmor de 0.245 à 2 MHz. La séquence de mesure utilisée est la séquence CPMG qui atténue les effets des hétérogénéités magnétiques et permet de mesurer la constante de temps de relaxation T_2 .

Les données mesurées sont une distribution de constantes de temps de relaxation T_2 et les teneurs en eau partielles associées en fonction de la profondeur (Figure 2.3). Dans cette distribution, deux temps de coupures à 3 ms et à 100 ms permettent de définir trois types de teneur en eau associées à trois gammes de tailles de pores : la teneur en eau des argiles (« clay water ») pour T_2 inférieur à 3 ms, la teneur en eau liée (« bound water ») pour T_2 compris entre 3 ms et 100 ms, la teneur en eau mobile (« moveable water ») pour T_2 supérieur à 100 ms. Ces limites ont été définies à partir de mesures de constantes de temps de relaxations en laboratoire sur des échantillons de sables et de calcaires saturés et dé-saturés. Par exemple, voir (Dunn et al., 2002). De cette distribution est également calculée la valeur T_{2ML} correspondant à la valeur moyenne de la distribution logarithmique des constantes T_2 .

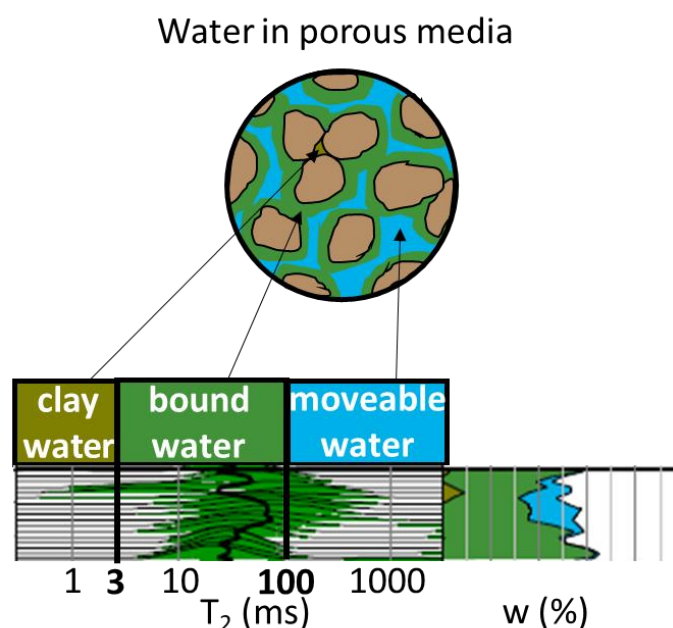


Figure 2.3 : Données BNMR : distribution de constantes de temps de relaxation T_2 et des teneurs en eau partielles associées. Deux temps de coupures à 3 ms et à 100 ms dans la séquence permettent de décomposer la teneur en eau totale en trois composantes en fonction de la taille des pores : la « clay water », la « bound water » et la « moveable water ».

Mesures NMR en surface (SNMR)

La mesure SNMR est faite avec des boucles posées en surface d'une taille comprise entre 10 x 10 m et 100 x 100 m soit un volume exploré (multi)-décamétrique. La mesure est basée sur le champ magnétique terrestre B_E d'une intensité de 25 à 65 μT soit une fréquence de Larmor de 1.06 à 2.8 kHz. La séquence utilisée est celle du FID permettant de mesurer T_2^* . La fréquence de Larmor est faible, les temps de mesure sont donc élevés. Appliquer la séquence CPMG comme en BNMR est trop long en terme de temps. De plus, le « dead time » est également plus long. Alors qu'en BNMR le dead time est considéré comme très court par rapport aux temps de relaxation les plus rapides, en SNMR cette hypothèse n'est pas valide et donc une partie des temps de relaxation les plus rapides ne sont pas mesurés et l'amplitude E_0 doit être interpolée avant le dead time. Cela conduit à des erreurs d'approximation à la fois des temps de relaxation et de l'amplitude selon la qualité de la courbe exponentielle décroissante.

La séquence du FID permet de mesurer une valeur de teneur en eau et de constante T_2^* intégrée sur le volume investigué. Plusieurs mesures sont faites à partir de pulses d'intensités croissantes. Les données mesurées correspondent à une valeur de teneur en eau et de T_2^* en fonction de la profondeur.

Séquence d'acquisition SNMR pour mesurer T_1

La mesure de la constante de relaxation T_1 nécessite une séquence de mesure comportant plusieurs décroissances exponentielles FID et donc l'injection de plusieurs pulses. Le premier pulse est injecté avec un angle de 90° par rapport à la direction du champ magnétique terrestre. La décroissance exponentielle FID1 mesurée est donc la décroissance de $M_\perp$ avec une amplitude E_0 et une constante de temps de relaxation T_2^* .

Après un délai défini au préalable, le second pulse est injecté à 90° par rapport au premier pulse (et donc à -180° du champ magnétique terrestre). Les spins non relaxés sont réorientés produisant de nouveau une composante $M_\perp$ non nulle avec une décroissance exponentielle FID2. La constante de temps de relaxation T_1 correspond à l'écart entre FID1 et FID2. La Figure 2.4 illustre la mesure des constantes de temps de relaxations T_1 et T_2^* .

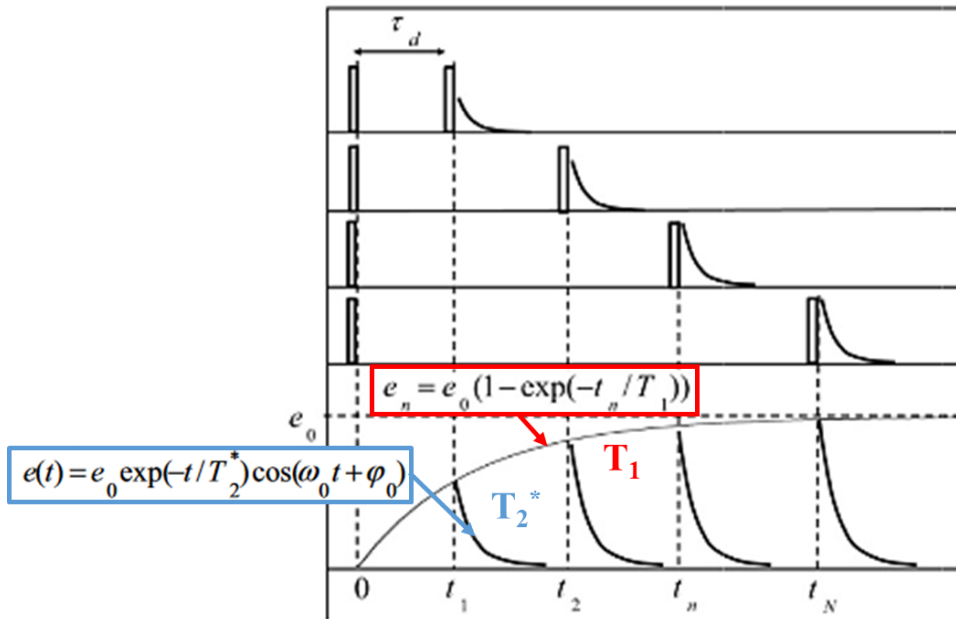


Figure 2.4 : Séquence de mesure utilisée pour mesurer T_1 (modifié de (Legtchenko, 2013))

Pour mesurer T_1 , plusieurs décroissances FID sont nécessaires pour décrire la courbe exponentielle, une séquence à deux FID est utilisée pour notre étude.

Inversion SNMR en 1D, 3D et time-lapse

L'inversion d'un sondage SNMR consiste à construire un modèle de teneur en eau en fonction de la profondeur. Elle résout l'intégrale de l'équation (1.4) (Legchenko and Valla, 2002), qui est une autre écriture de l'équation (1.1).

$$e(q) = \frac{\omega_0}{I_0} \int_V B_{\perp} M_{\perp} \sin\left(\frac{\gamma B_1 q}{2I_0}\right) w dv \quad (1.4)$$

avec $e(q)$ le signal électrique mesuré, $B_{\perp}$ la composante transverse du champ électromagnétique de la boucle, $M_{\perp}$ la composante transverse du champ électromagnétique produit par la magnétisation des spins et w la teneur en eau, $q = I_0 \tau$ un pulse de courant électrique d'amplitude I_0 et de durée τ à la fréquence de résonance des spins de protons dans la champ magnétique terrestre B_0 (= fréquence de Larmor : $\omega_0 = \gamma B_0$ avec γ le ratio gyromagnétique). Pour l'inversion, l'équation (1.4) est approximée linéairement par l'équation matricielle (1.5) :

$$Aw = e_0 \quad (1.5)$$

avec A la matrice d'inversion, e_0 le vecteur des décroissances exponentielles mesurées, w le vecteur des teneurs en eau calculées. L'inversion consiste à résoudre l'équation (1.6) en inversant la matrice A .

$$w = A^{-1}e_0 \quad (1.6)$$

Le logiciel utilisé pour l'inversion dans notre étude est le logiciel SAMOVAR développé par Anatoly LEGTCHENKO. Dans SAMOVAR, la méthode SVD (Single Value Decomposition) est associée au calcul d'inversion et le l'incertitude associée (Legchenko et al., 2017). La matrice d'inversion est décomposée en un produit de trois matrices (Equation 1.7) :

$$A = USV^T \quad (1.7)$$

avec A la matrice d'inversion, U la matrice des données, S la matrice des valeurs singulières et V la matrice du modèle inverse. La méthode SVD permet de calculer une incertitude sur le modèle inverse à partir de la covariance de la solution (Equation 1.8) et l'intervalle de confiance à 95 % associé (Equation 1.9).

$$cov(w_{L2}) = \sigma^2 V S^{-2} V^T \quad (1.8)$$

$$\Delta w_{95} = 1.96 \times \sqrt{diag(cov(w_{L2}))} \quad (1.9)$$

avec w_{L2} la teneur en eau inversée et $\sigma_m = 0.5 \times \Delta w_{95}$ l'écart-type associé.

Pour stabiliser le calcul d'inversion, une régularisation avec la méthode de Tikhonov est appliquée et agit comme un filtre réduisant l'effet des valeurs singulières les plus faibles. Le filtre correspond à une matrice diagonale F dont les éléments diagonaux suivent l'Equation 1.10.

$$f_j = \frac{s_j^2}{s_j^2 + \eta} \quad (1.10)$$

avec f_j les éléments diagonaux de la matrice F et η le smoothing factor (SF). L'équation 1.8 exprimant la covariance devient alors (Equation 1.11) :

$$cov(w_{L2}) = \sigma^2 V F S^{-2} V^T \quad (1.11)$$

Le filtre de régularisation appliqué lors de l'inversion permet de stabiliser l'inversion et de réduire l'intervalle de confiance de la solution mais dégrade la résolution (Legchenko, 2021; Legchenko et al., 2017). Pour déterminer l'intervalle de profondeur sur lequel la solution du modèle inverse est bien résolue, il est donc nécessaire d'analyser à la fois le profil de résolution avec régularisation et l'intervalle de confiance à 95 % associé à la solution (Equation 1.14). En pratique, plus l'intervalle de confiance à 95 % est élevé, plus la résolution est faible.

Lorsque le milieu d'étude présente de fortes variations spatiales d'amplitude et/ou de temps de relaxation, c'est-à-dire une forte hétérogénéité spatiale ne pouvant pas être représentée en 1D, une acquisition permettant une inversion 3D est possible afin de mieux traduire cette variabilité spatiale. Lors d'une acquisition SNMR dans un objectif 3D, une série de sondages 1D sont mesurés dans une configuration spatiale telle que les sondages se recoupent. L'inversion SNMR en 3D consiste à regrouper ces sondages 1D mesurés indépendamment dans un jeu de données 3D pour les inverser dans un modèle 3D. L'équation (1.9), adaptée pour un système 3D est approximée linéairement par l'équation matricielle (1.10). Dans un système 3D, la matrice A est une matrice rectangulaire $I \times J$ avec $I = K \times L$; $K = \sum_{l=1}^L K_l$; $J = J_x \times J_y \times J_z$. Avec K_l le nombre de pulses pour une boucle l , L le nombre de boucles, et J_x, J_y, J_z le nombre de cellules dans les directions x, y et z du modèle 3D (Legchenko, 2021; Legchenko et al., 2011).

Pour chaque sondage, la sensibilité de la boucle dépend de sa position par rapport à la cible et de l'inclinaison du champ magnétique terrestre. Le recoupement des boucles dans un jeu de données 3D permet de recouper des zones de haute et de basse sensibilité. Plus le nombre de recouvrements de boucles est élevé sur une zone donnée et meilleure est la sensibilité sur cette zone. Le filtre linéaire, calculé pour chaque sondage 1D permet de discrétiser l'ensemble des cellules investiguées par ce sondage. Le regroupement de tous les filtres dans une même matrice d'inversion avec la réponse des sondages 1D positionnés dans un même référentiel, permet de calculer le modèle 3D de l'ensemble du jeu de données dans un seul volume 3D.

Pour suivre une variation temporelle de teneur en eau SNMR, l'acquisition consiste à mesurer un sondage 1D SNMR et à répéter cette mesure dans le temps. Lorsque les sondages 1D présentent une variation importante de l'amplitude avec le temps, une inversion time-lapse permet d'inverser ensemble l'ensemble des sondages 1D. L'inversion time-lapse consiste à construire un modèle de teneur en eau à deux dimensions en fonction de la profondeur et du temps. De la même manière que pour une inversion 3D, les sondages sont mesurés en 1D indépendamment puis regroupés en un jeu de données 2D et positionnés dans un même référentiel pour être inversés ensemble. La différence principale entre une inversion indépendante de chaque sondage et une inversion time-lapse, c'est que lors d'une inversion 1D, l'erreur systématique de mesure associée au milieu géologique est prise en compte, or la géologie est identique si le sondage est toujours positionné au même endroit. L'inversion time-lapse ajoute une contrainte d'inversion en fonction du temps et d'intégrer cette erreur systématique répétée pour ne traduire que les variations temporelles de teneur en eau associées à l'hydrologie du milieu. Pour plus de détails sur l'inversion time-lapse, voir par exemple (Legchenko et al., 2022, 2020).

Écarts entre T_2 et T_2^* et w_{SNMR} et w_{BNMR}

Afin de tenter une comparaison pertinente des teneurs en eau et des constantes de temps de relaxation mesurées par la SNMR et la BNMR, plusieurs méthodologies de corrections ou de comparaison de ces paramètres ont été proposées dans la littérature.

Pour les écarts entre les constantes de temps de relaxation, les équations (1.12) et (1.13) donnent une décomposition plus détaillée des constantes T_2 et T_2^* :

$$\frac{1}{T_2^*} = \frac{1}{T_{2B}} + \frac{1}{T_{2S}} + \frac{1}{T_{2IH}} \quad (1.12)$$

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2B}} + \frac{1}{T_{2S}} + \frac{1}{T_{2D}} \quad (1.13)$$

Avec T_{2B} le temps de relaxation de l'eau, T_{2S} le temps de relaxation de surface et T_{2D} le temps de diffusion des protons sur la surface. Les deux constantes T_2 et T_2^* sont sensibles aux hétérogénéités magnétiques respectivement via les termes $\frac{1}{T_{2D}}$ et $\frac{1}{T_{2IH}}$ (Equations 1.14 et 1.15).

$$\frac{1}{T_{2D}} = D \frac{(\gamma G t_e)^2}{12} \quad (1.14)$$

$$\frac{1}{T_{2IH}} = \frac{\gamma}{2\pi} \Delta B_0 \quad (1.15)$$

Avec D la constante de diffusion de l'eau ($D = 2.46 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ à 30°C), G la valeur moyenne du gradient du champ magnétique, t_e le temps d'écho des spins, γ le ratio gyromagnétique, ΔB_0 les variations du champ magnétique statique.

Le terme T_{2D}^{-1} , sensible aux hétérogénéités magnétiques à l'échelle porale est proportionnel au terme t_e^2 , facteur contrôlé avec la séquence de mesure CPMG utilisée pour les mesures BNMR. La séquence CPMG permet de réduire le facteur T_{2D}^{-1} devenant théoriquement négligeable par rapport aux termes de l'équation 1.13. En simplifiant et combinant les équations (1.12) et (1.13) on retrouve l'équation (1.3) c'est-à-dire la relation entre T_2 et T_2^* .

Le terme T_{2IH}^{-1} est estimé et corrigé à partir des mesures des variations du champ magnétique statique du milieu (le champ magnétique terrestre ou CMT) selon l'équation (1.16) :

$$\frac{1}{T_{2IH}} = \frac{\gamma}{2\pi} \Delta B_0 \quad (1.16)$$

Cette mesure des variations du CMT peut être faite soit en forage (Knight et al., 2012) ou sur la surface de la boucle SNMR (Flinchum et al., 2019). En pratique, ce terme est soit négligé en considérant la susceptibilité du milieu comme faible et donc la composante T_{2IH} négligeable permettant de considérer que $T_2 \approx T_2^*$. Par exemple, (Sullivan et al., 2020) fait une interprétation qualitative de T_2^* en le supposant équivalent à T_2 . S'il n'est pas négligé, ce terme est corrigé aux valeurs de T_2 pour construire un « pseudo- T_2^* » qui sera comparé au T_2^* (e.g. Flinchum et al., 2019; Knight et al., 2012; Müller-Petke et al., 2011).

La teneur en eau est directement proportionnelle à l'amplitude à l'origine E_0 . La teneur en eau est donc fortement affectée par le dead-time en SNMR engendrant une perte de signal sur les temps de relaxation rapides et donc la perte de cette composante dans la teneur en eau totale. Pour la correction du l'effet du dead-time, plusieurs propositions sont faites dans la littérature :

(1) en coupant les temps de relaxations les plus courts dans la distribution de T_2 en BNMR. Par exemple, (Knight et al., 2012) ont un dead-time de 10 ms avec des mesures SNMR. Après avoir corrigé la composante T_{2IH}^{-1} et construit un « pseudo- T_2^* », ils coupent la distribution BNMR de T_2 pour ne garder que les teneurs en eau et temps de relaxations supérieurs à 10 ms et recalculent la valeur T_{2ML} . Après ces corrections, ils obtiennent une bonne corrélation entre le T_{2ML} corrigé et le pseudo- T_2^* . (Müller-Petke et al. 2011) ont un dead-time de 40 ms avec des mesures SNMR. Ils coupent la distribution BNMR de T_2 à 30 ms et 80 ms, recalculent les teneurs en eau BNMR respectives et simplifient les profils verticaux de teneur en eau BNMR obtenus. Puis ils comparent ces valeurs aux teneurs SNMR mesurées et inversées avec plusieurs méthodes d'inversion. Ils montrent qu'avec le meilleur algorithme d'inversion issue de la comparaison, ils obtiennent une bonne corrélation entre les teneurs en eau SNMR inversées et le profil vertical simplifié de teneur en eau BNMR coupé à 80 ms.

(2) en considérant le log moyen de T_2 BNMR ($= T_{2ML}$) comme modèle direct, en simulant le signal SNMR correspondant et en l'inversant permettant d'obtenir le T_2^* SNMR équivalent (Flinchum et al., 2019). Ils trouvent une bonne corrélation entre la teneur en eau totale, le T_{2ML} BNMR et la réponse en teneur en eau, T_2^* SNMR simulée à partir de ces mêmes données. Cependant, la comparaison de la réponse SNMR mesurée, corrigée de T_{2IH}^{-1} avec celle simulée à partir des données BNMR montrent une bonne cohérence qualitative mais avec une sous-estimations des valeurs respectives par les mesures SNMR.

2.2.2 Les méthodes électriques

Tomographie de résistivité électrique (ERT) et polarisation provoquée (IP) en surface

La tomographie de résistivité électrique (ERT) consiste à mesurer la distribution de résistivité électrique du sol en réponse à un courant électrique injecté. La méthode est basée sur le principe de la loi d'Ohm qui consiste à mesurer la résistance électrique du sol en réponse à l'injection d'un courant électrique (Equation 1.21) :

$$U = RI \quad (1.21)$$

Avec I le courant électrique injecté, U la tension (ou le potentiel) mesurée et R la résistance électrique. Sur une section cylindrique, la résistance électrique dépend de la longueur de la section d , de l'aire de cette section A et de la résistivité électrique du milieu ρ (Equation 1.22) :

$$R = \rho \left(\frac{d}{A} \right) \quad (1.22)$$

La résistivité électrique du milieu est sa capacité à s'opposer à la traversée du courant. La mesure de la résistivité électrique consiste à injecter un courant I entre deux électrodes A et B (ou C1 et C2) et à mesurer la différence de potentiel ΔV aux bornes des électrodes M et N (ou P1 et P2) (Figure 2.5).

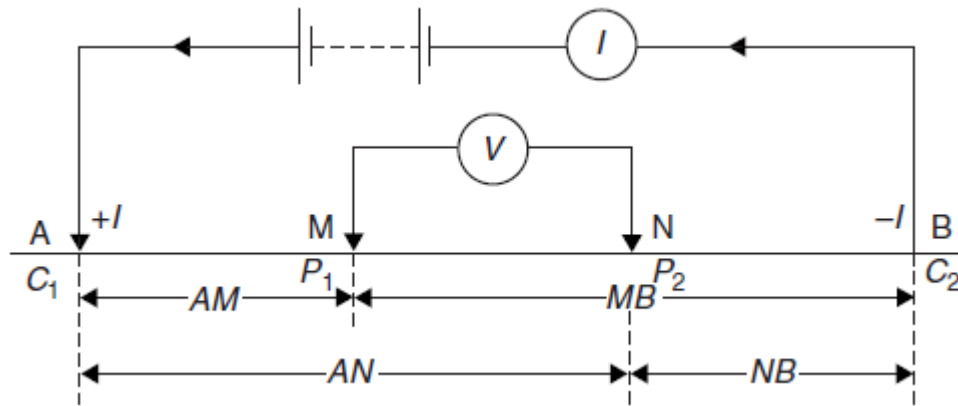


Figure 2.5 : Configuration générale des électrodes lors d'une mesure de résistivité électrique (Reynolds, 2011)

La mesure obtenue est une résistivité électrique apparente qui est inversée pour obtenir la résistivité électrique. La sub-surface est considérée comme un demi-espace homogène et dans ce cas la résistivité apparente mesurée s'écrit selon l'équation (1.23) avec K le facteur géométrique pour un demi-espace homogène (1.24) (Reynolds, 2011):

$$\rho_a = KR = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1.23)$$

$$K = 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right]^{-1} \quad (1.24)$$

Avec AM ; MB ; AN et NB les distances respectives entre les électrodes A, B, M et N (Figure 2.5). Plusieurs configurations d'électrodes existent pour faire les mesures ERT, les plus

communément utilisées sont les configurations Wenner, Schlumberger et Dipôle-Dipôle (Figure 2.6) avec des distances inter-électrodes définies permettant de simplifier le calcul du facteur géométrique.

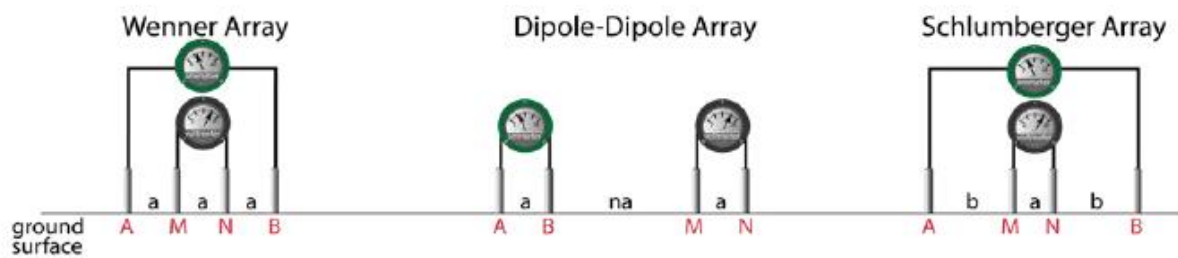


Figure 2.6 : Configurations d'électrodes communément utilisées en ERT (Singha et al., 2022)

En augmentant la distance entre les électrodes, on augmente le volume et la profondeur du milieu dont on mesure la résistivité électrique.

Le principe de la polarisation provoquée (IP) utilise le phénomène électrique par lequel le sous-sol retient temporairement les charges électriques après l'arrêt d'injection du courant électrique. Le dispositif de mesure avec les électrodes est identique à celui de l'ERT. Le paramètre mesuré est une distribution de chargeabilités apparentes qui est inversée pour obtenir une distribution de chargeabilités, de même que l'ERT mesure une distribution de résistivités électriques apparentes, inversée en une distribution de résistivité électrique. La différence entre les méthodes ERT et IP est que l'ERT mesure la différence de potentiel ΔV aux bornes des électrodes M et N (Figure 2.5) à l'état permanent alors que l'IP mesure la décroissance de différence de potentiel ΔV à l'état transitoire. Pour plus d'informations sur les méthodes électriques, voir par exemple (Singha et al., 2022).

Mesure de résistivité électrique en forage (BER)

La mesure de résistivité électrique en forage (BER) est une mesure de la résistivité électromagnétique (EM). La mesure consiste à injecter un champ EM dans une boucle émettrice puis à mesurer la composante en quadrature du champ EM secondaire dans une boucle réceptrice distante de la boucle émettrice. La sonde présente deux espacements entre les boucles émettrices et réceptrices permettant de mesurer deux courbes de conductivité électrique à espacement court et long en fonction de la profondeur. La conductivité électrique est l'inverse de la résistivité électrique, permettant ainsi de calculer les courbes de résistivités électriques pour les espacements courts et longs en fonction de la profondeur.

En complément, dans cette étude, des mesures de densité gamma-gamma sont également faites en forage. Le principe est de faire une mesure nucléaire active des rayonnements gamma pour déterminer la densité des formations géologiques. Un flux de rayons gamma est émis par un émetteur et va interagir avec la roche. Deux détecteurs sont présents sur la sonde pour corriger les effets de forage et mesurer les rayons gamma qui ont interagit avec la roche. Le flux de rayonnement mesurés par le récepteur est proportionnel à la densité électronique qui a interagit dans la roche, et est une fonction exponentielle de la densité de la roche (Serra and Serra, 2003; Telford et al., 1990).

Loi empirique reliant l'ERT et la teneur en eau : la loi d'Archie

La relation d'Archie, telle que formulée par (Archie, 1942), relie la résistivité électrique du milieu ρ , à la porosité φ , et à la saturation S_w de la formation géologique (Equation 1.25).

$$\rho = a\rho_f\varphi^{-m}S_w^{-n} \quad (1.25)$$

avec ρ_f la résistivité électrique du fluide ($\Omega.m$), a une valeur empirique reliée à la tortuosité, m et n , respectivement les facteurs exponentiels de la cimentation et de la saturation. Cette relation a été formulée à partir de mesures en laboratoire sur des échantillons de sable de taille de grain homogène, en faisant varier la salinité de l'eau et sa saturation. La loi d'Archie est donc valable pour évaluer la porosité efficace d'un milieu homogène avec une porosité inter-granulaire et des pores de taille homogène.

(Abbas et al., 2022) ont calculé les paramètres a et m de la loi d'Archie pour les calcaires de Beauce à l'échelle du forage (Tableau 2.1). Ils ont mesuré la résistivité de l'eau dans les forages avec une sonde. Ils ont défini les paramètres a et m en inversant les valeurs de résistivité électrique mesurées en forage (BER) et les teneurs en eau simulées par (Isch et al., 2022) à la date des mesures BER. La valeur n a été fixée à 2.

Elevation	a	m	n	$\rho_f (\Omega.m)$
111-116 m	0.6	1.47	2	20

Tableau 2.1 : Paramètres de la loi d'Archie calculés par (Abbas et al., 2022) pour les calcaires de Beauce sur le site OZNS

Pour calculer les paramètres de la loi d'Archie, ils ont supposé les calcaires de Beauce comme un sédiment avec des grains de taille moyenne à grossière, proche des tailles de grain d'un milieu sableux. Ils ont fait le calcul à la profondeur correspondant aux calcaires massifs fracturés où ils ont supposé que la teneur en eau argile et la conductivité de surface sont négligeables.

Cependant les calcaires de Beauce ont un réseau poral avec des connectivités et des tailles de pores variables. (Müller-Huber et al., 2015) discute l'effet de la variation de la taille de rayon des pores sur la porosité et sur le facteur de cimentation m pour des échantillons de calcaires comparés à des échantillons de sable et de grès. Ils ont étudié deux types d'échantillons de calcaire : les premiers avec des vacuoles et des fractures et les seconds avec une porosité intra-granulaire. La valeur du facteur m calculée par (Abbas et al., 2022) correspond aux fourchettes de valeurs pour les calcaires présentant des vacuoles et des fractures, ce qui est cohérent avec la description des calcaires à la profondeur où ils ont été prélevés. On peut donc raisonnablement considérer que ces paramètres d'Archie sont applicables pour les calcaires de Beauce aux profondeurs auxquelles ils ont été définis.

Partie 3 Caractérisation hydro-géophysique des hétérogénéités lithologiques et de teneur en eau sur le site OZNS

Chapitre 3.1 : Introduction et jeu de données

3.1.1 Introduction

Les résultats présentés dans cette partie ont fait l'objet de deux communications : à l'EGU 2023 d'une part et à GEOFCAN 2023 d'autre part. Les résumés respectifs sont en Annexe 1 et 2. De plus, une partie des résultats présentés dans cette font l'objet d'une publication en cours de soumission (Annexe 3), dont certaines figures sont extraites.

Cette partie a pour objectif de caractériser les hétérogénéités lithologiques et hydriques de la ZNS sur le site OZNS à échelle décamétrique et d'étudier la réponse SNMR à ces hétérogénéités. Comme présenté dans la section 1.2.1, les études précédentes ont permis : (1) de caractériser la lithologie et les propriétés hydriques de la ZNS à l'échelle centimétrique à partir d'études sur échantillons (Aldana, 2019; Aldana et al., 2021). (2) De montrer une cohérence entre l'imagerie globalement tabulaire obtenue par la géophysique avec la description lithologique faite sur les échantillons de carotte (C. Mallet et al., 2022). Pour caractériser ces hétérogénéités à l'échelle décamétrique, une acquisition géophysique multi-méthode et multi-échelle a été effectuée en 2020. Ce chapitre présente le dispositif d'acquisition global sur le site OZNS où de nombreuses mesures ont été faites, afin d'avoir un visuel global de l'ensemble des données acquises et de leur positionnement les unes par rapport aux autres. Les chapitres suivant présenteront en détail les données et résultats par méthode géophysique (Chapitres 3.2 à 3.4) et les corrélations entre méthodes et échelles (Chapitre 3.5). Le Chapitre 3.6 discutera les résultats, leurs limites et perspectives.

3.1.2 Jeu de données mesuré sur le site OZNS

La campagne d'acquisition géophysique simultanée multi-méthodes et multi-échelles a eu lieu sur le site OZNS en septembre 2020 avant le creusement du puits, sauf pour les conductivités électriques en forage (BER) mesurées en mai 2020. Ces données comprennent à la fois des données géophysiques et de diagraphie. La Figure 3.1 présente la localisation de l'ensemble des dispositifs de mesure géophysiques lors de la campagne de septembre 2020 sur le site OZNS. Le tableau synthétise les données mesurées qui seront exploités dans cette étude.

Données	Configuration	Date
SNMR : 10 sondages 1D	SQ 50m 2 tours Tx-Rx 16 pulses	31/08 au 08/09
ERT/IP : 8 profils	48 électrodes 2.5m dipôle-dipôle	25/08 au 02/09
Micro-gravimétrie	218 stations gravimétriques; maille 10 m x 10 m	21/08 au 23/08
6 tomographies géoradar en forage	Discretisation des Tx tous les 20 cm et Rx tous les 50 cm	21/07 et 22/07

Tableau 3.1 : Caractéristiques de mesure des données géophysiques de surface et de tomographie géoradar en forage

Date	Organisme	Forages	Diagraphies	Remarques
25/05/2020 26/05/2020	SEMM Loggin	SC5, SC6, SC7, SC8, SC9	gamma naturel, conductivité électrique, gamma- gamma, neutron-neutron, diamètreur, trajectométrie, imagerie optique	trou nu foré en 125 mm
15/09/2020	NMRSA	SC5, SC6, SC7, SC8	NMR logging BMR 60	Idem prec.
15/09/2020	NMRSA	SC8, SC9	NMR logging BMR 90	Idem prec.

Tableau 3.2 : Récapitulatif des mesures de diagraphies réalisées dans les forages (voir rapport d'acquisition BRGM RP-72842-FR, (Baltassat et al., 2025))

L'analyse portera plus particulièrement sur deux paramètres géophysiques mesurés à la fois en géophysique de surface et en forage : la teneur en eau (mesurée par SNMR en surface et par BNMR en forage) et la résistivité électrique (mesurée par ERT en surface et par diagraphie de conductivité électrique en forage). Pour l'interprétation à échelle multi-décamétrique, les données de chargeabilité (mesurée par IP) seront également exploitées et pour l'interprétation à l'échelle centimétrique, les données de densité en forage seront également exploitées.

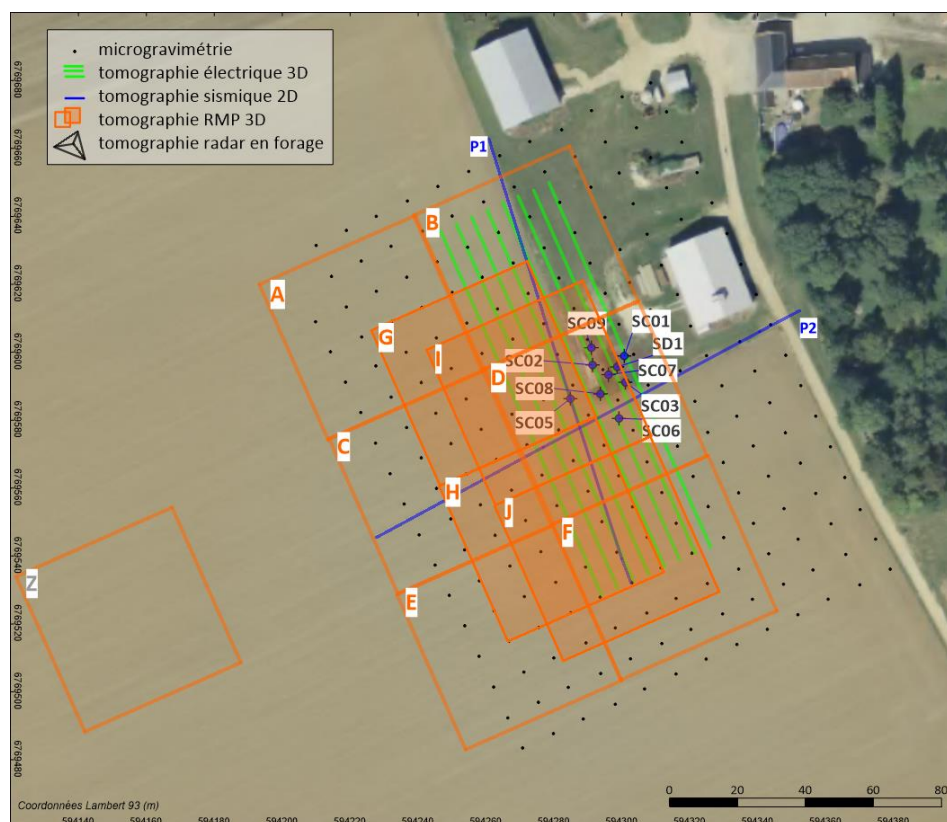


Figure 3.1 Localisation des dispositifs de mesures géophysiques et des 9 forages (SC01 à SC09) sur le site OZNS lors de la campagne d'acquisition de 2020.

Chapitre 3.2 : Données SNMR

3.2.1 Acquisition et filtrage des données

Acquisition SNMR 3D sur le site OZNS

Le jeu de données SNMR acquis sur le site OZNS comprend 10 sondages mesurés entre le 31/08/2020 et le 10/09/2020 dont les caractéristiques détaillées sont présentées dans le Tableau 3.3.

La configuration de mesure utilise une séquence de 2 pulses en opposition de phase permettant l'évaluation de la constante de temps de relaxation longitudinale, T_1 . Les durées des pulses sont de 30 ms, les temps d'enregistrement de 240 ms et le temps mort instrumental est de 40 ms. La boucle de sondage, carrée, de 50 m de côté, 2 tours est utilisée en émission et réception (Tx-Rx) et une boucle identique située à au moins 50 m de la boucle de sondage est utilisée comme boucle de mesure du bruit ambiant (Nx) pour être utilisée comme référence pour le filtrage multivoie (Rapport BRGM RP-72842-FR). La Figure 3.2 présente le positionnement relatif des boucles SNMR acquises.

Sondage (Tx-Rx)	Boucle de bruit (Nx, Cx)	Date	Configuration de boucle	Nb de pulses, pulses	Nb de stacks
SQ50A200831	SQ50F	31/08/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16, 1-16	300
SQ50B200902	SQ50E	02/09/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16, 1-16	300
SQ50C200903	SQ50Z	03/09/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16, 1-16	300
SQ50D200903	SQ50Z	03/09/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16, 1-16	300
SQ50E200902	SQ50A	02/09/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16, 2-16	250
SQ50F200901	SQ50A	01/09/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16, 1-16	300
SQ50G200905	SQ50Z	05/09/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16, 2-16	300
SQ50H200904	SQ50Z	04/09/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16, 1-16	300
SQ50I200907	SQ50Z	07/09/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16, 2-16	300
SQ50J200908	SQ50Z	08/09/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16, 2-16	300

Tableau 3.3 : Caractéristiques des sondages SNMR réalisés sur OZNS en août-septembre 2020. Tx-Rx = boucle émission-réception ; Nx = boucle de mesure de bruit éloigné (Figure 3.1), dispositif NUMIS^{POLY} ; SQ50 2t = boucle carrée de 50 m de côté 2t.

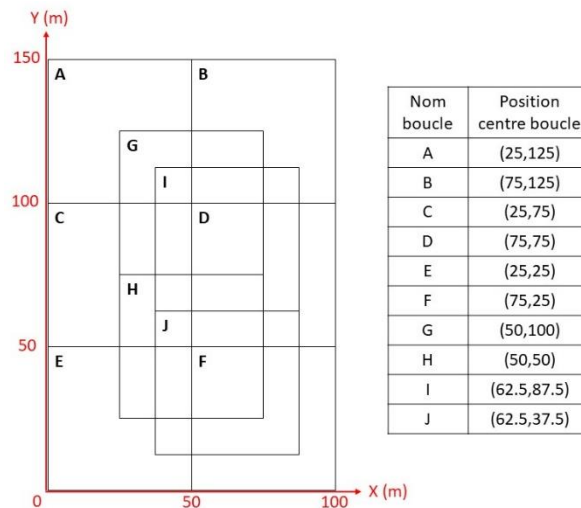


Figure 3.2 : Positionnement relatif des boucles SNMR lors de l'acquisition des sondages.

Filtrage des données SNMR sur le site OZNS

Afin d'exploiter le jeu de données SNMR dans de bonnes conditions, différentes étapes préalables d'évaluation, traitement et analyse du jeu de données sont nécessaires :

- Traitement de chaque sondage SNMR (stack, filtrage) pour évaluer la qualité du jeu de données et améliorer le rapport S/N
- Imagerie 1D de la teneur en eau par inversion 1D de chaque sondage
- Calcul des constantes de temps de relaxation pour chaque sondage
- Analyse de la variabilité spatiale pour évaluer la pertinence d'une inversion 2D ou 3D
- Définition de la profondeur d'investigation maximale et de la résolution d'inversion

Traitement des sondages SNMR

Le traitement des sondages RMP a été fait avec le logiciel NUMPro développé par l'IRD/IGE (A. Legchenko, communication personnelle). Différentes options de filtrages sont possibles dans NUMPro :

- Le stack consiste à sommer l'ensemble des signaux mesurés pour chaque pulse afin d'augmenter l'amplitude du signal mesuré et de réduire le bruit (donc augmenter le rapport S/N). L'option RDEO de NUMPro permet d'optimiser ce stack avec une pondération par l'inverse de l'énergie de l'enregistrement.
- Le filtrage Notch à 50 Hz permet de filtrer avec une bande de ± 1 Hz les fréquences et harmoniques du 50 Hz associées au réseau électrique européen. La largeur de la bande autour de la fréquence peut être choisie avec les options « wide » ou « narrow » (= 50 Hz GN pour « Notch Global Narrow »).
- L'option spike level rejection consiste à rejeter les pics au-delà d'un seuil d'amplitude.
- L'option noise level rejection consiste à rejeter les enregistrements au-delà d'un seuil de bruit.

Pour évaluer la qualité du sondage et l'efficacité du filtrage, plusieurs paramètres sont utilisés :

- *Des paramètres qualité* : rapport signal/bruit (= S/N) et rapport bruit ambiant/bruit instrumental (= EN/IN avec IN estimé à 5 nV). Le niveau de bruit ambiant au moment de la mesure ayant une conséquence directe sur la qualité des sondages mesurés, plus le rapport S/N est élevé et le rapport EN/IN faible, meilleure est la qualité du sondage.
- *Les maximum d'amplitude des signaux mesurés* : le maximum d'amplitude E_0 (= E_{0max}) et le maximum d'amplitude moyenne E_{mean} (= E_{max}).
- *L'erreur RMSE* (Root Mean Square Error) correspond à l'erreur d'ajustement entre les données et le modèle inverse.

Plusieurs tests de filtrage ont été réalisés. Le traitement retenu en définitive pour l'ensemble des sondages est présenté dans Le Tableau 3.4.

site	sounding	date	coil	pulses nb	pulses	dead time (ms)	nstack	Processing	stack optimisa tion	spike level rejection	noise level rejection	BandPass (Hz)	Notch
OZNS	SQ50A2008 31	8/31/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16	1-16	40	300	f1-4	RDEO	600	/	10	50 Hz G N
OZNS	SQ50B20090 2	9/2/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16	1-16	40	300	f5-5	RDEO	/	5000	10	50 Hz G N
OZNS	SQ50C20090 3	9/3/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16	1-16	40	300	f3-1	RDEO	6000	/	10	50 Hz G N
OZNS	SQ50D2009 03	9/3/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16	1-16	40	300	f3-5	RDEO	6000	/	10	50 Hz G N
OZNS	SQ50E20090 2	9/2/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16	2-16	40	250	f1-1	RDEO	6000	/	10	50 Hz G N
OZNS	SQ50F20090 2	9/2/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16	1-16	40	300	f1-4	RDEO	6000	/	10	50 Hz G N
OZNS	SQ50G2009 05	9/5/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16	2-16	40	300	f2-4a	RDEO	6000	/	10	50 Hz G N
OZNS	SQ50H2009 04	9/4/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16	1-16	40	300	f2-3a	RDEO	6000	/	10	50 Hz G N
OZNS	SQ50I20090 7	9/7/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16	2-16	40	300	f1-1	RDEO	6000	/	10	50 Hz G N
OZNS	SQ50J20090 8	9/8/2020	Tx-Rx SQ50 2t, Nx SQ50 2t	16	2-16	40	300	f1-1	RDEO	6000	/	10	50 Hz G N

Tableau 3.4 : Traitement NUMPro retenu pour chaque sondage.

Inversion 1D sous SAMOVAR

L'inversion 1D des sondages RMP est réalisé grâce au logiciel SAMOVAR V12.4 développé par l'IRD/IGE (A. Legchenko, communication personnelle). Les paramètres d'inversion retenus après plusieurs tests sont les suivants :

- Régularisation automatique de la teneur en eau w et des constantes de temps de relaxation T_1 et T_2^* .
- Inversion « smooth » qui permet une inversion lissée avec un nombre de couches conséquent. (Par opposition à l'inversion « block » qui permet une inversion contrainte sur un nombre de couches réduit).
- La matrice d'inversion et le modèle inverse ont une profondeur de 70 m.

Les sondages finaux ont un rapport S/N compris entre 2.00 nV et 7.04 nV pour des EN/IN compris entre 2.84 nV et 10.92 nV, sauf les sondages G et I plus bruités avec respectivement un S/N de 1.52 nV et 1.76 nV et un EN/IN de 24.17 nV et 16.40 nV.

Evaluation des constantes de temps de relaxation T_1 et T_2^*

Les valeurs de T_1 et T_2^* sont sensibles à la qualité des mesures et du niveau de bruit, et étant peu résolues, nous évaluons les T_1 et T_2^* aux mêmes points avec le maximum de S/N pour assurer la qualité de valeur retenue. Les maximums de S/N des sondages correspondent à la base de ZNS et à la partie supérieure de la zone saturée dont la contribution est considérée a priori comme majoritaire. Les évaluations réalisées de T_1 et T_2^* correspondent donc globalement aux caractéristiques des calcaires de Beauce saturés. La Figure 3.3 montre un exemple de choix des points pour l'évaluation de T_1 et T_2^* avec le sondage A.

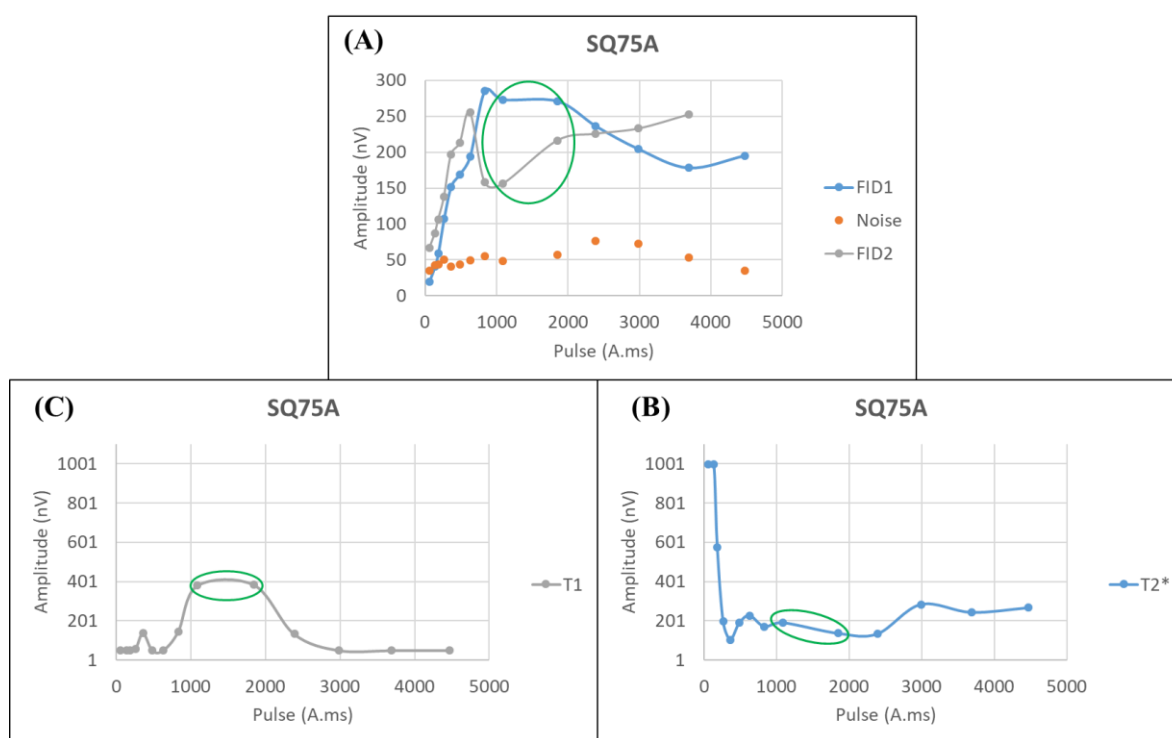


Figure 3.3 : Courbe (A) des amplitudes moyennes, (B) du temps de relaxation T_1 , (C) du temps de relaxation T_2^* , en fonction du pulse pour le sondage A. Les points encadrés en vert avec le maximum d'amplitude et l'écart le plus important entre FID1 et FID2 correspondent aux points retenus pour estimer T_1 et T_2^* pour ce sondage.

Analyse de la variabilité spatiale

L'analyse de la variabilité spatiale permet d'évaluer le niveau d'hétérogénéité du site et le type d'inversion adaptée (1D, 2D ou 3D). Trois paramètres sont pris en compte pour évaluer cette variabilité spatiale : le maximum d'amplitude $E_{0\max}$ (traduisant une variabilité de teneur en eau dans le milieu) et les constantes de temps de relaxation T_1 ou T_2^* (traduisant une variabilité des tailles de pore du milieu). Une forte variabilité de ces paramètres dans un même milieu traduit donc l'hétérogénéité du milieu.

La Figure 3.4 présente la distribution spatiale des amplitudes E_0 après inversion 1D pour toutes les courbes de sondage. Le Tableau 3.5 synthétise pour chaque sondage la valeur $E_{0\max}$ et les temps de relaxation T_1 et T_2^* estimés.

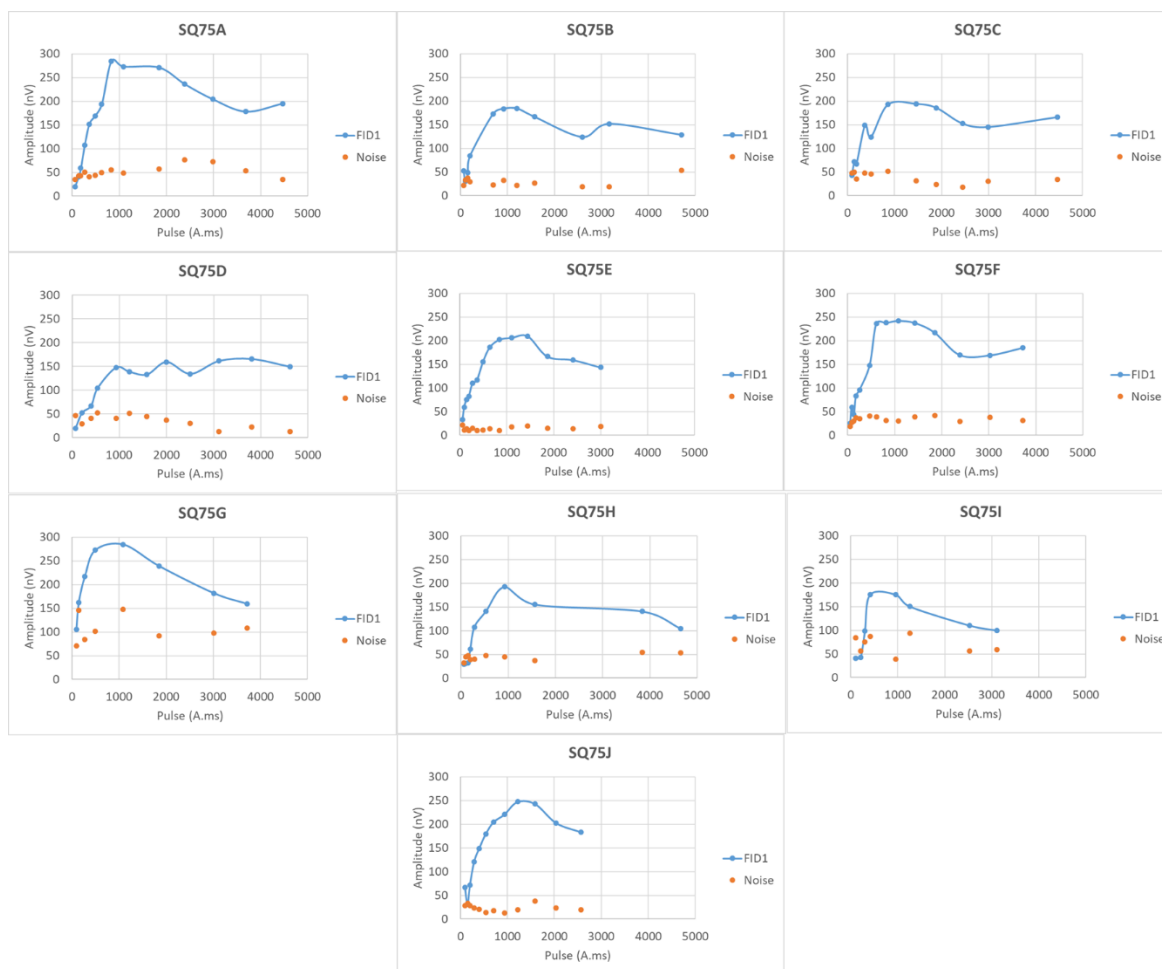


Figure 3.4 : Sondages SNMR en amplitude E_0 et bruit.

Sondage	S/N (nV)	EN/IN (nV)	$E_{0\max}$	T_2^* estimé	T_1 estimé
SQ50A200831	2.34	10.49	285	270	400
SQ50B200902	3.03	10.92	184	175	300
SQ50C200903	3.17	9.82	193	220	460
SQ50D200903	3.59	8.89	160	160	250
SQ50E200902	7.04	2.84	209	195	170
SQ50F200902	2.98	7.05	241	235	220
SQ50G200905	1.52	24.17	284	195	300
SQ50H200904	2.00	9.194	192	200	240
SQ50I200907	1.76	16.40	175	195	400
SQ50J200908	5.14	4.67	242	230	450

Tableau 3.5 : Rappels de S/N et EN/IN et valeurs de $E_{0\max}$, T_2^* estimé et T_1 estimé pour chaque sondage.

D'après la Figure 3.4 et le Tableau 3.5, les valeurs E_{0max} sont très variables entre 160 et 285 nV ainsi que les courbes des sondages. De même, les temps de relaxation T_1 et T_2^* estimés sont très variables, compris respectivement entre 170 et 460 ms et entre 160 et 270 ms. Cette forte hétérogénéité du milieu nous invite à inverser ce jeu de données en 3D.

Profondeur d'investigation maximale de l'inversion

La profondeur d'investigation max (DOI max) ou la profondeur maximale de détection d'eau avec la méthode SNMR, est définie dans SAMOVAR comme la profondeur d'une couche d'eau d'un mètre d'épaisseur qui produit le signal égal au niveau de bruit. La profondeur maximale dépend du moment d'impulsion max et du niveau de bruit. La profondeur est estimée à partir de la courbe du DOI des sondages A et E (Figure 3.5). Les profondeurs maximales sont de 55 m pour le sondage A et de 70 m pour le sondage E. On peut estimer la profondeur maximale d'investigation à 60 m. Cette profondeur correspondra à la profondeur du modèle SNMR inversé en 3D.

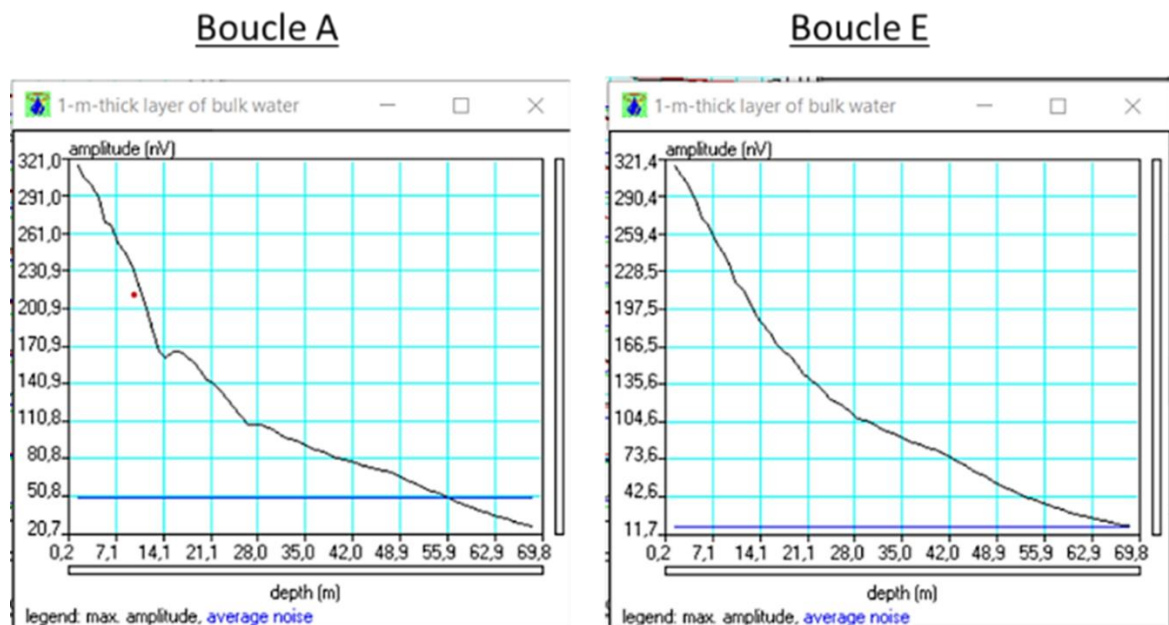


Figure 3.5 : Amplitude du signal provenant d'une couche d'eau libre en fonction de profondeur de cette couche. Le croisement de cette courbe avec le niveau de bruit moyen (ligne bleue) donne la valeur du DOI max.

3.2.2 Inversion et résultats

Inversion 3D des données SNMR sur OZNS

L'inversion 1D des sondages RMP est réalisé grâce au logiciel SAMOVAR V12.0 développé par l'IRD/IGE (A. Legchenko, communication personnelle). Le modèle 3D utilisé pour l'inversion est composé de cellules unitaires de dimension 10 x 10 x 2 m. La Figure 3.6 montre la disposition 3D des boucles et la zone de bonne couverture où le nombre de recoupement des sondages est élevé.

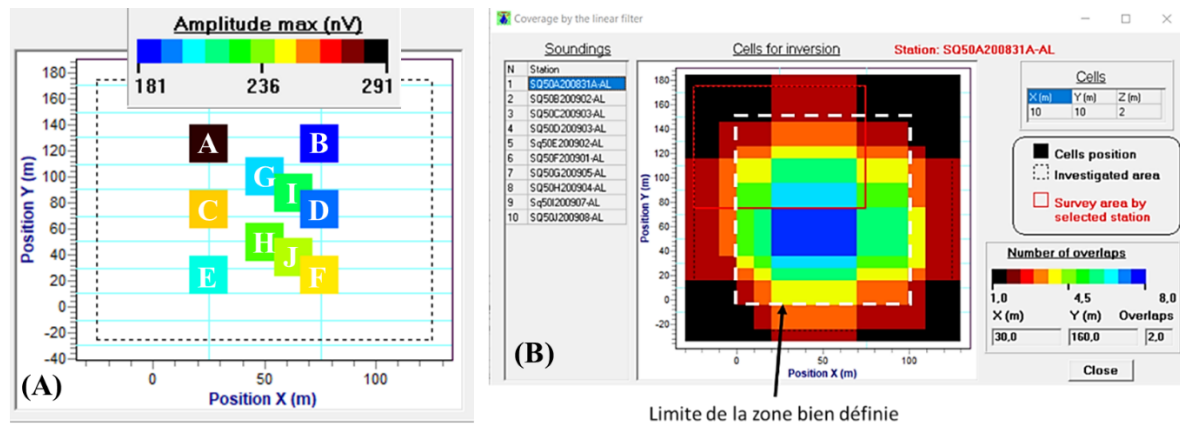


Figure 3.6 : (A) Disposition des boucles dans le modèle d'inversion 3D, (B) Recouvrement des boucles et zone de bonne couverture (rectangle en pointillé blanc).

Plusieurs types d'inversion sont possibles : inversion complexe et optimisation complexe du signal (amplitude + phase), inversion complexe avec optimisation de l'amplitude du signal, inversion et optimisation de l'amplitude du signal uniquement. Le déphasage dépend de la conductivité du milieu. La présence d'une couche saturée peu profonde, d'un milieu conducteur ou la valeur de T_1 sont des paramètres qui influencent les valeurs de déphasage. La phase du signal SNMR est sensible au niveau de bruit et des signaux SNMR bruité peuvent produire des erreurs d'inversion n'ayant pas de réalité physique (Legchenko et al., 2011; Legtchenko, 2013). Etant donné la qualité insuffisante de nos sondages SNMR (S/N maximum de 10, cf. paragraphe analyse qualité) pour envisager une inversion complexe fiable, l'inversion a été faite en amplitude uniquement.

La Figure 3.7 présente le résultat de l'inversion et l'erreur RMSE en 3D. L'erreur RMSE globale est de 16.19 nV et les erreurs RMSE pour chaque sondage sont comprises entre 10 et 20 nV. L'ensemble de ces erreurs sont inférieures aux niveaux de bruit (Figure 3.7: points bleus) et donc l'inversion 3D est considérée comme satisfaisante.

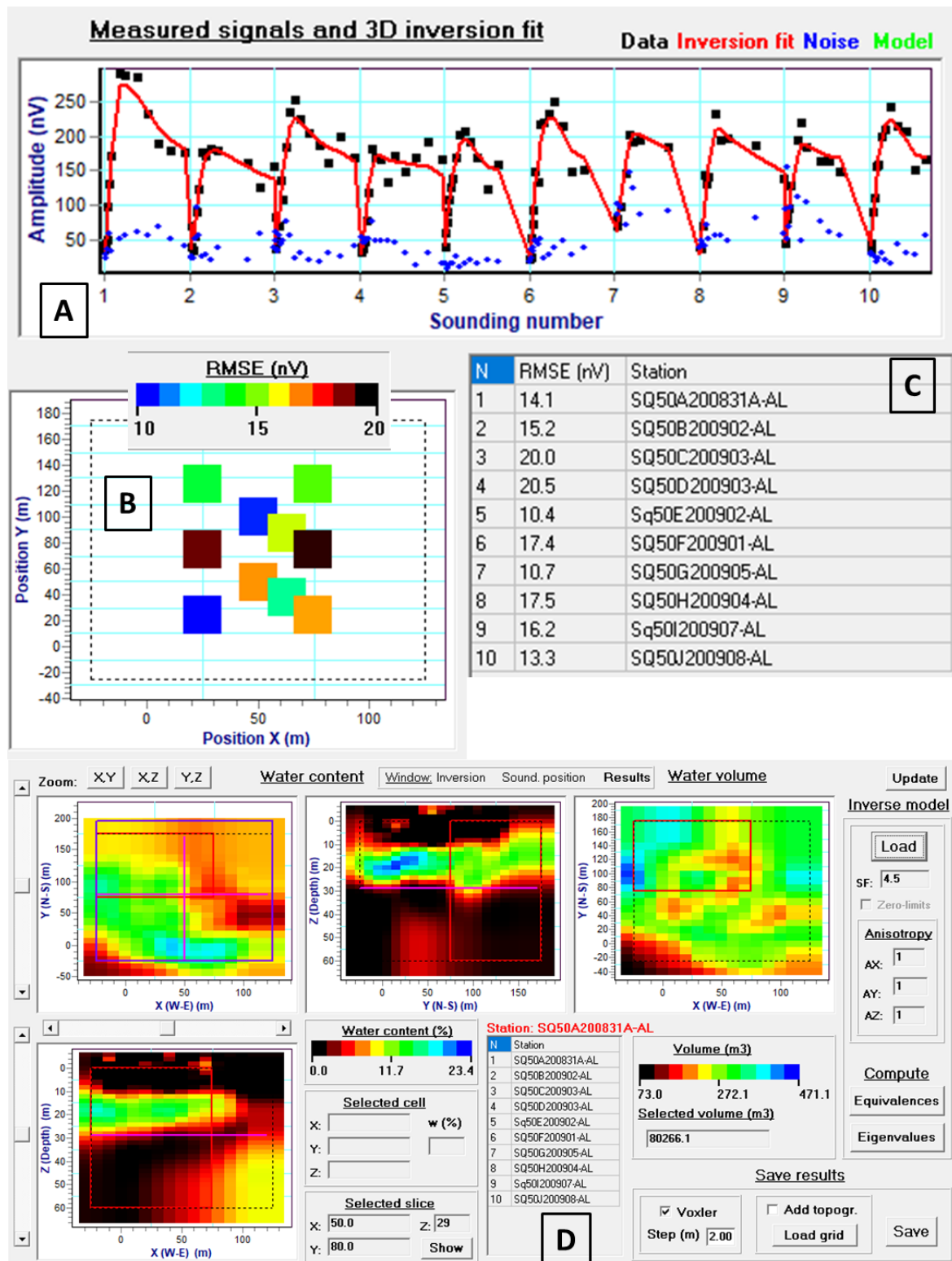


Figure 3.7 : (A) Résultat du fit des sondages dans le modèle 3D pour la solution retenue avec une erreur RMSE = 16.19 nV. (B) RMSE spatialisé de chaque sondage, (C) Erreur comprise entre 10 et 20 nV. (D) Résultat de l'inversion 3D

Interprétation du modèle 3D de teneur en eau SNMR

La Figure 3.8 présente deux sections horizontales du modèle 3D de teneur en eau SNMR à 120 m (ZNS) et à 110 m (zone saturée).

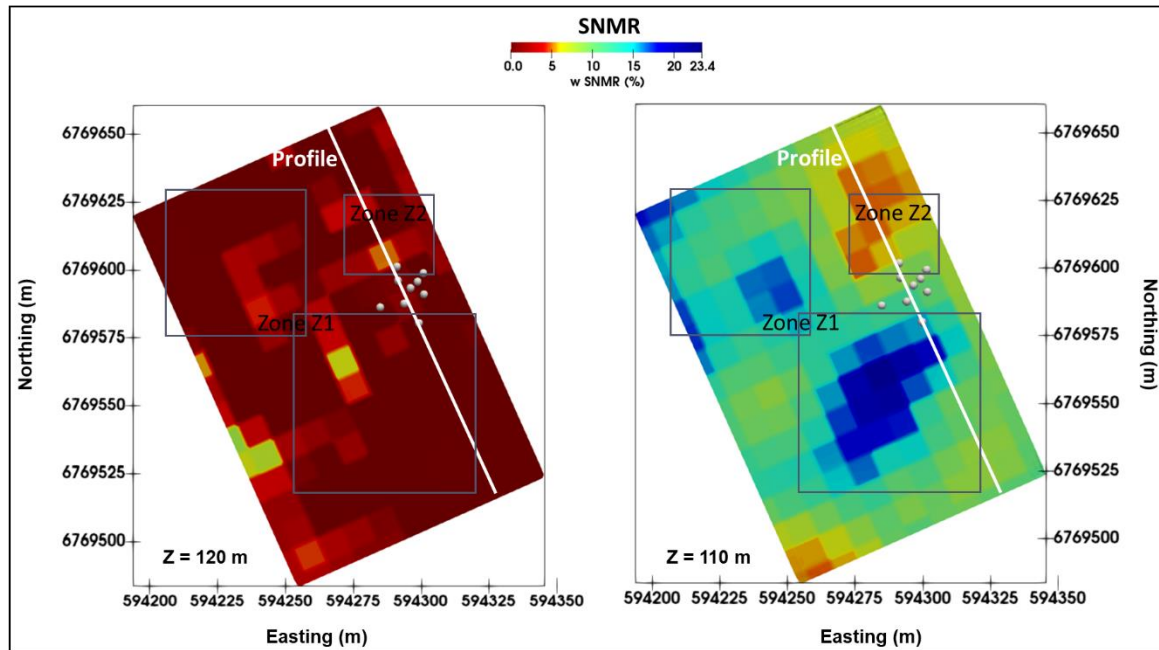


Figure 3.8 : Sections horizontales extraites du modèle 3D de teneur en eau SNMR à 120 m d'élévation dans la ZNS (gauche) et à 110 m d'élévation dans la zone saturée (droite). Les points blancs représentent la position des forages. Les rectangles gris délimitent les zones Z1 et Z2 interprétées. La ligne blanche représente la trace du profil NS dont la section verticale sera interprétée par la suite.

A 120 m (ZNS), la teneur en eau SNMR est homogène avec une teneur en eau de 0 - 5 %. Plusieurs interprétations sont possibles pour expliquer cette faible teneur en eau : (1) une faible teneur en eau dans la ZNS, (2) un milieu avec des tailles de pores de petites tailles dont le T_2^* est inférieur au dead-time et donc la teneur en eau non mesurée, par exemple un calcaire avec une porosité fine associée à de faibles tailles de pore ou un calcaire argileux.

A 110 m (zone non saturée), la teneur en eau globale SNMR est de 10 % avec deux anomalies : la première dans la zone Z2 avec une teneur en eau de 5 – 8 % et la seconde dans les zones Z1 avec une teneur en eau moyenne de 15 – 22 %. On interprète les variations de teneurs en eau SNMR comme des variations de porosité en milieu saturé : la zone Z1 serait interprétée comme un calcaire fracturé/karstifié et la zone Z2 comme un calcaire moins poreux, moins karstifié et fracturé. La faible teneur en eau dans la zone Z2 peut être aussi interprétée comme associée à un calcaire argileux.

Pour préciser la profondeur des anomalies, la Figure 3.9 présente une section verticale extraite du modèle 3D le long du profil NS, passant à la fois par les zones Z1, Z2 et les forages (Figure 3.8).

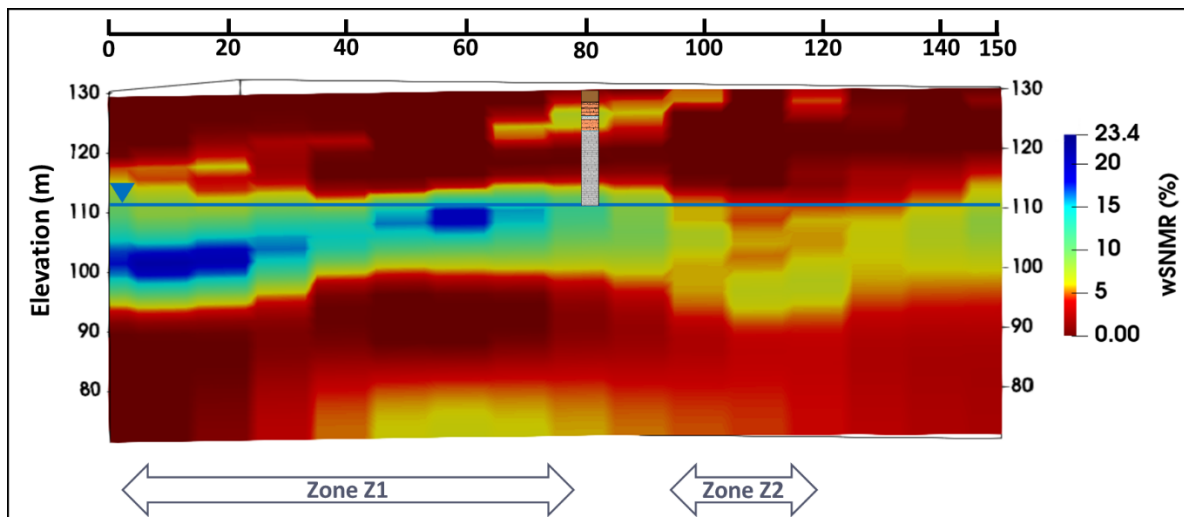


Figure 3.9 : Section verticale extraite du modèle 3D de teneur en eau SNMR à la position du profil NS passant par les zones Z1, Z2 et par des forages (Figure 3.8). La ligne bleue représente le niveau piézométrique, les flèches grises délimitent les zones Z1 et Z2 définies précédemment.

Dans la zone non saturée, les variations de teneur en eau SNMR montrent une augmentation progressive de la teneur en eau en profondeur à partir de 116 m dans la zone Z1 (Figure 3.9). Deux effets pouvant agir ensemble, peuvent expliquer cette augmentation progressive de teneur en eau SNMR au-dessus de la nappe : (1) La teneur en eau dans la frange capillaire et/ou l'eau de rétention dans la zone non saturée. (2) L'effet de lissage associé à l'inversion du toit de la couche d'eau SNMR (principalement la zone saturée).

Dans la zone saturée, il y a une large différence de teneur en eau SNMR entre les zones avec une teneur en eau de 15 – 22 % en Z1 et de 5- 8 % en Z2 (Figure 3.9). Comme interprété précédemment, on explique ces différences par des différences de porosité avec une fracturation plus importante en Z1 qu'en Z2. A noter également, la forte baisse de la teneur en eau (moins de 5 %) sous la couche d'eau associée à la zone saturée à partir de 100 m et avec les mêmes variations que les limites du toit de la couche. A cette profondeur, sous le calcaire saturé, se trouve la formation des marnes du Gâtinais définie de façon variable comme des marnes ou comme un calcaire marneux. Le taux d'argile plus élevé explique la baisse de teneur en eau SNMR sous la couche des calcaires fracturés saturés avec une faible teneur en eau SNMR mesurée à cette profondeur.

Interprétation des variations de la constante de temps de relaxation T_2^*

Les variations de constante de temps de relaxations T_1 et T_2^* peuvent être interprétées comme des variations de porosité. Cette section vise à analyser les variations spatiales de T_2^* et à les interpréter en regard des interprétations précédentes faites sur le modèle 3D de teneur en eau SNMR pour la zone saturée, profondeur pour laquelle les valeurs ont été estimées et interprétée comme un calcaire avec une porosité variable.

(Vouillamoz, 2003) a proposé une approche expérimentale pour caractériser les aquifères avec la RMP et notamment la zone saturée avec la teneur en eau et les temps de relaxation T_1 et T_2^* à partir de mesures faites dans différents milieux. La Figure 3.10 reprend son graphique sur lequel sont placés les caractéristiques (T_1 , T_2^* et teneur en eau) mesurées sur le site OZNS pour

notre étude. D'après l'auteur et les à priori hydrogéologiques sur les caractéristiques des aquifères, différentes zones de la Figure 3.10 peuvent être rapprochées de différents types de réservoirs : aux fortes valeurs de teneur en eau correspondent des réservoirs à forte porosité (sables et craie), et aux grandes valeurs de constante de temps de relaxation des tailles de pores importantes (galets, zones fissurées et figures de dissolution karstique) (Vouillamoz, 2003).

D'après la Figure 3.10 et les cercles de classification, pour T_2^* , tous les points d'OZNS sont dans le cercle des milieux « craie, galets, sable », perméables à forte porosité, sauf le point D situé à la limite de ce cercle. On observe également une cohérence dans l'origine géographique des formations de ce cercle puisque la craie et les sables proviennent du Bassin Parisien tout comme les Calcaires de Beauce. Seuls les galets de la Durance ont une origine géographique différente. Pour T_2^* , les valeurs sont également compatibles avec les valeurs mesurées dans les milieux karstiques. Sur la base de ces observations, on interprète donc notre aquifère comme un aquifère sédimentaire à forte porosité (teneur en eau élevée et cohérente avec les observations faites dans le même ensemble géologique) et avec pour partie des tailles de pores élevées compatible avec du karst.

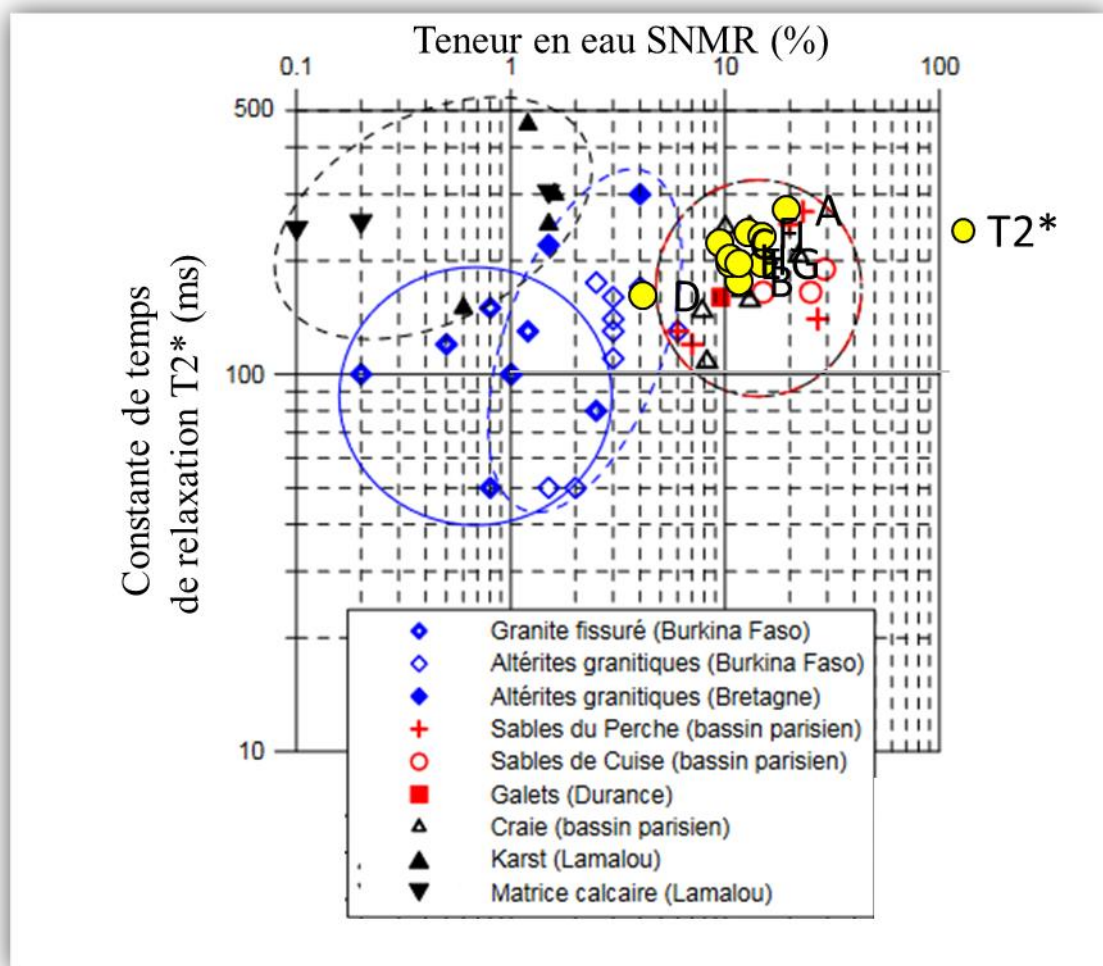


Figure 3.10 : Relation expérimentale entre la constante de temps de relaxation T_2^* et la teneur en eau SNMR pour différents milieux (modifié de Vouillamoz 2003). Les points OZNS sont les symboles jaunes avec les étiquettes noires.

Afin de mieux visualiser la variabilité spatiale des distributions de T_2^* , la Figure 3.11 présente la carte de T_2^* . Pour le tracé de la carte, chaque sondage SNMR est représenté comme une surface carrée de 50 m de côté à laquelle est attribuée une valeur de T_2^* , celle-ci est supposée homogène sur l'ensemble de la surface du sondage. Lorsque les surfaces de deux sondages se recoupent, la moyenne des valeurs de T_2^* des deux sondages est retenue. Les constantes T_2^* sont donc moyennées dans les zones de recoupement des sondages. Cette carte est comparée à la section horizontale de teneur en eau SNMR extraite du modèle 3D dans la zone saturée.

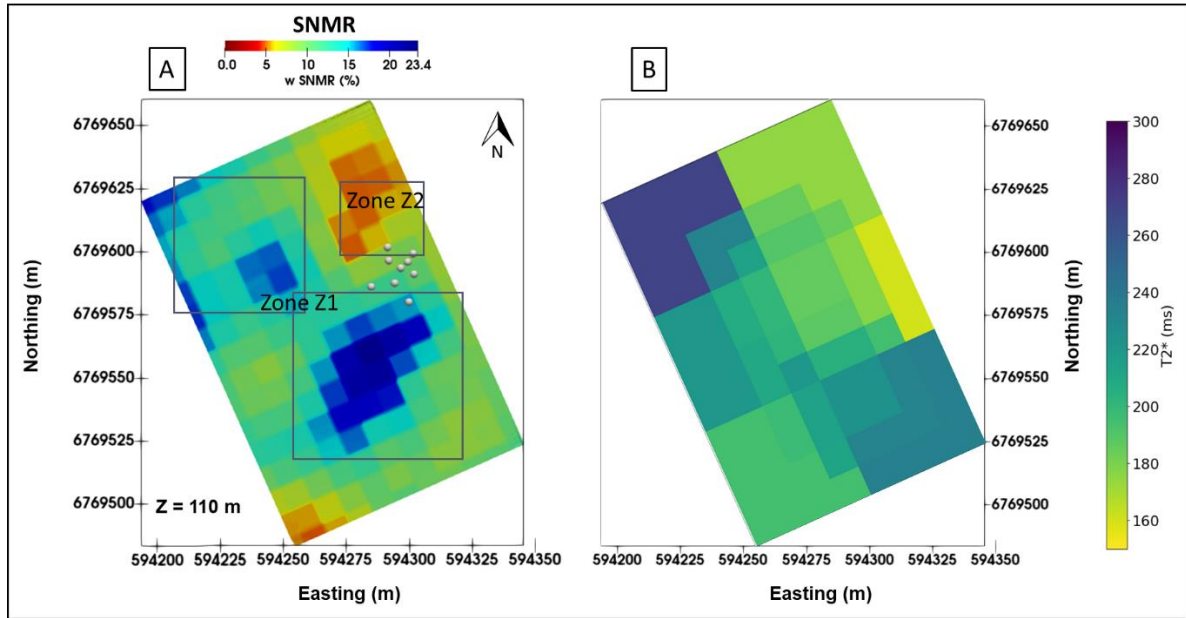


Figure 3.11 : (A) Section horizontale de teneur en eau SNMR extraite du modèle 3D à 110 m (zone saturée). Les points blancs représentent la position des forages. Les rectangles gris délimitent les zones Z1 et Z2 interprétées. (B) Carte de la distribution spatiale des constantes de temps de relaxation T_2^* , calculée à partir des valeurs de T_2^* sur les sondages 1D.

D'après la Figure 3.11, bien que la résolution soit beaucoup plus faible que pour le modèle 3D, on observe des variations de T_2^* en cohérence avec les variations de teneur en eau. En moyenne, les valeurs de T_2^* sont à 200 - 220 ms. Sur la zone N-NE, on observe des valeurs de T_2^* plus faibles à 150 – 180 ms que l'on peut interpréter comme des tailles de pores plus faibles. Cette délimitation est cohérente avec la position de la zone Z2 sur la section extraite du modèle 3D de teneur en eau avec des valeurs plus faibles à 5-8 % que la moyenne à 10 %. Sur les zones O-NO et SE, on observe des valeurs de T_2^* plus élevées à 240 – 300 ms, que l'on peut interpréter comme des tailles de pores plus élevées. Cette délimitation est cohérente avec la position des zones Z1 sur la section extraite du modèle 3D de teneur en eau avec des valeurs plus élevées à 15-22 % par rapport à la moyenne à 10 %. Cette carte de T_2^* , bien qu'avec une résolution limitée, nous permet d'affiner notre modèle en distinguant des zones de teneur en eau élevée avec des tailles de pore plus grandes que l'on pourrait interpréter comme un calcaire très fracturé voir karstique et des zones de teneur plus faible avec des tailles de pore plus faibles que l'on pourrait interpréter comme un calcaire moins fracturé.

3.2.3 Nouvelle boucle SNMR décimétrique

Pour permettre une comparaison à échelle équivalente des mesures BNMR et SNMR, cinq boucles décimétriques SNMR ont été construites et installées dans le puit OZNS lors du creusement du puit entre octobre et décembre 2021. Ces boucles ont pour objectif de faire des mesures de teneur en eau SNMR à petite échelle dans la ZNS à différentes profondeurs. Cette section synthétise les principales caractéristiques des boucles installées, l'ensemble est présenté de façon plus détaillée dans le rapport BRGM RP-71648-FR (Ryckebusch et al., 2025).

Chaque boucle est composée de deux parties principales : le capteur de mesure c'est-à-dire une boucle électromagnétique circulaire composée de 40 spires de câble cuivre 6 mm², recouvert par un blindage aluminium permettant d'éviter les couplages électromagnétiques en éliminant la composante électrique pour ne conserver que la composante magnétique. La seconde partie contient les câbles qui remontent jusqu'à la surface, recouverts par un blindage aluminium et une gaine de protection. Le blindage aluminium de la boucle est ramené en surface grâce à un troisième fil (dans la gaine de protection) et raccordé au blindage des câbles remontants en tête (surface) (Figure 3.12 pour le schéma explicatif et Figure 3.13 pour les photos).

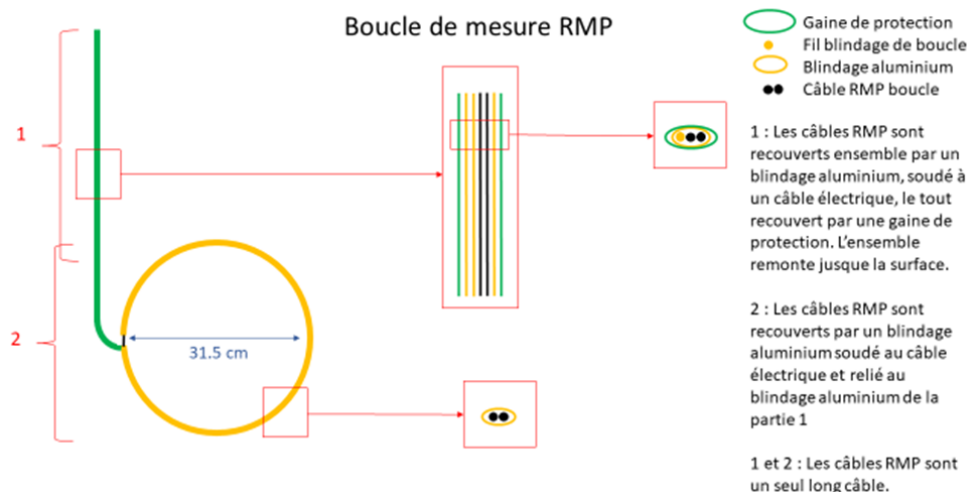


Figure 3.12 : Schéma explicatif de la boucle. RMP = SNMR. (Rapport BRGM RP-71648-FR)

Les boucles sont placées dans des boîtes PVC et installées dans le puit entre la roche de la ZNS et les claveaux du puit dans un fillaire de remplissage. Pour tenir compte de l'échauffement des boucles pendant les mesures, celles-ci sont isolées thermiquement avec une ouverture vers le matériau de remplissage pour évacuer la chaleur et une sonde de température est installée à l'extérieure de la boîte PVC côté ZNS (Figure 3.14 pour le schéma explicatif et Figure 3.15 pour les photos).

Au total, cinq boucles ont été installées entre 5 et 11 m de profondeur (= entre 125 m et 120 m d'élévation) sur le côté Est du puit pour que le champ EM injecté soit à un angle de 90 ° par rapport au champ magnétique terrestre (Figure 3.16).

Malheureusement, il n'y a pas de mesures faites avec ces petites boucles à ce jour dans le temps imparti de la thèse c'est pourquoi, seul le dispositif installé est présenté.

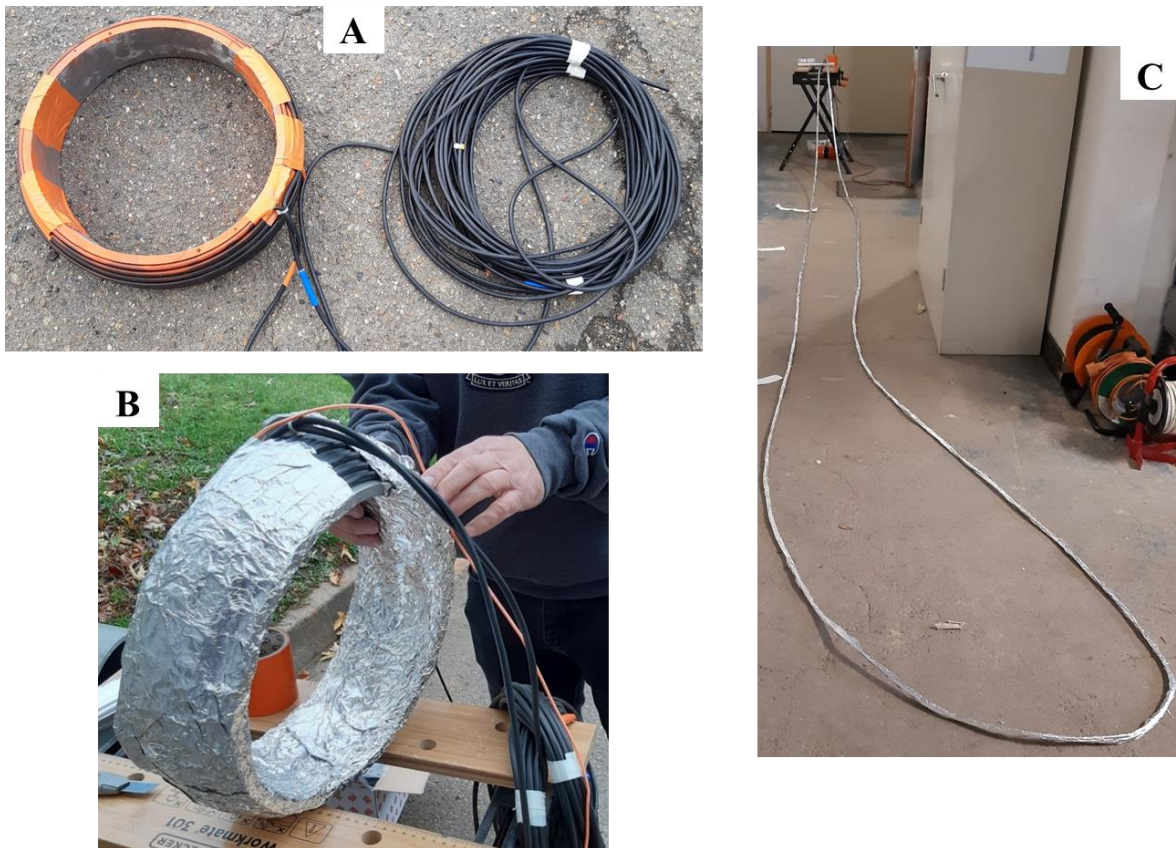


Figure 3.13 : Photos de : (A) la boucle SNMR à gauche et les longueurs remontant en surface, (B) le blindage de la boucle, (C) le blindage du câble remontant. (Rapport BRGM RP-71648-FR)

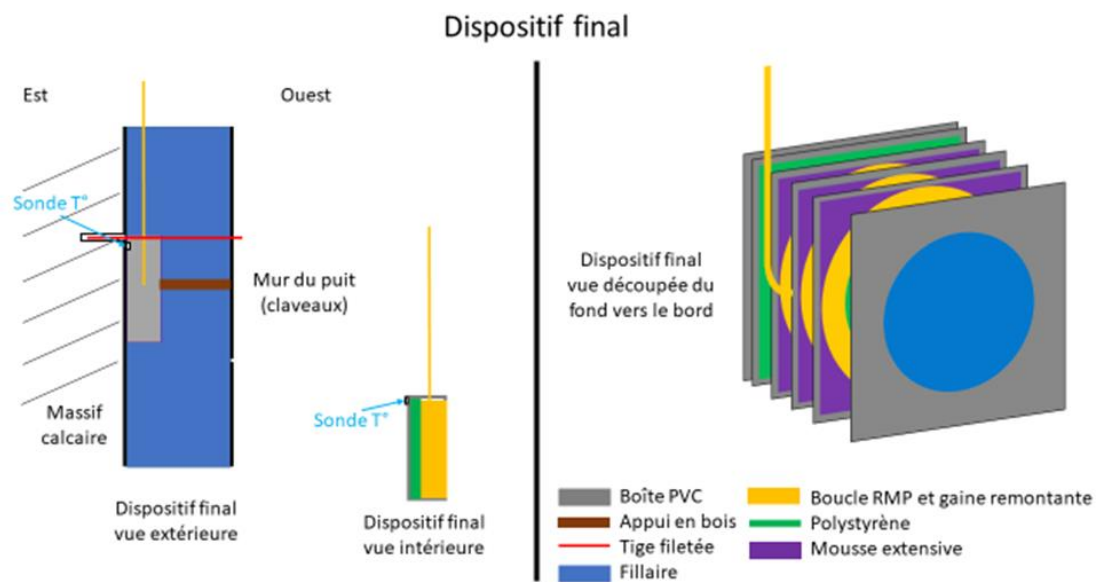


Figure 3.14 : Dispositif final intégrant la boucle SNMR, le capteur de température et l'isolant thermique, le tout placé dans une boîte en PVC. (Rapport BRGM RP-71648-FR)



Figure 3.15 : Boucle SNMR dans la boîte PVC (A) côté ZNS avec la sonde température (cercle rouge) et (B) installée dans le puit avec une ouverture côté claveaux ouvertes pour permettre le remplissage par le fillaire. (Rapport BRGM RP-71648-FR)

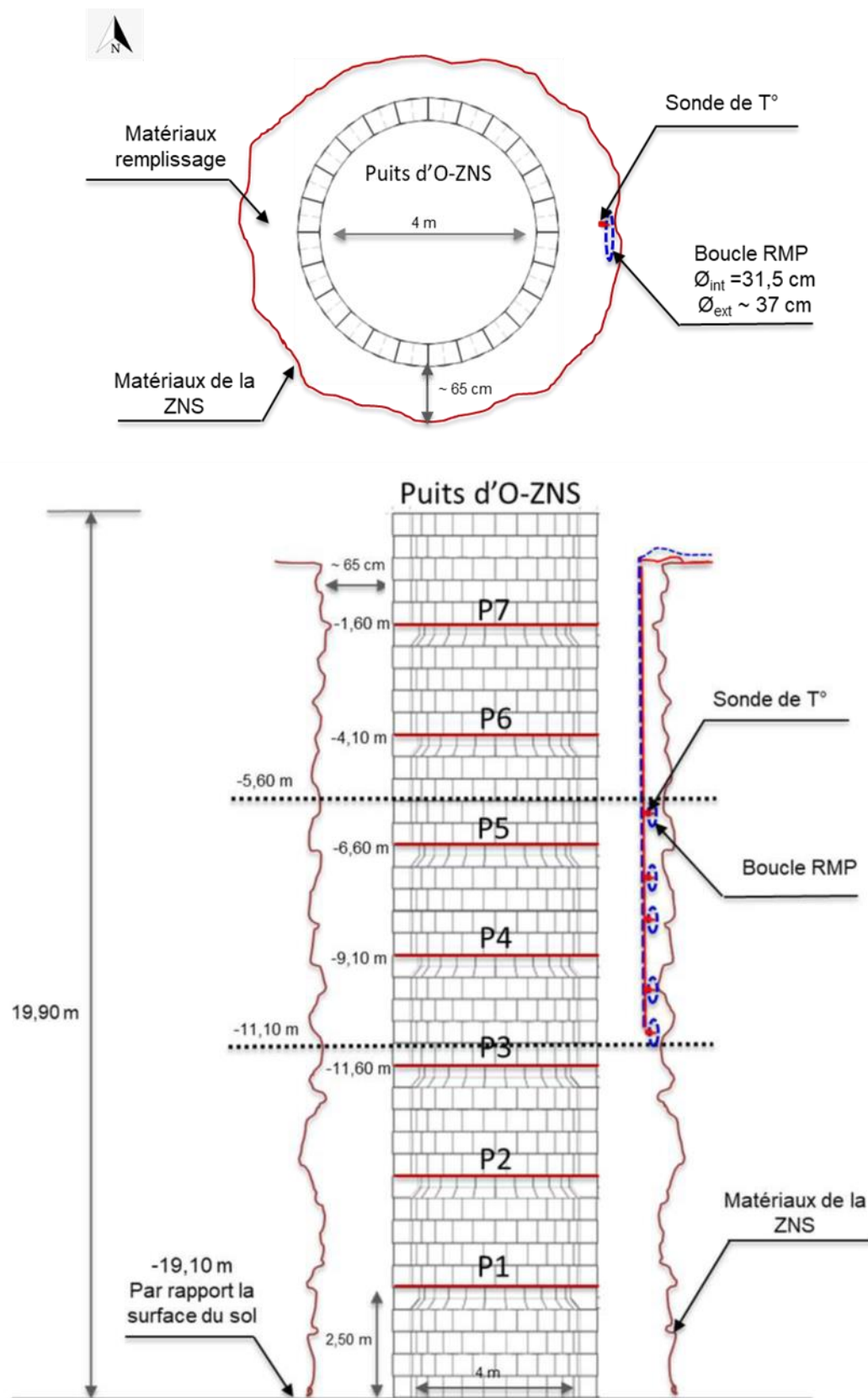


Figure 3.16 : Plan du site expérimental d'O-ZNS et position de la boucle par rapport au site. (Rapport BRGM RP-71648-FR)

Chapitre 3.3 :Données BNMR

3.3.1 Acquisition et traitement des données

Les mesures BNMR ont été faites par l'entreprise NM RSA sur les forages SC05-6-7-8-9. Différentes sondes ont été utilisées : une sonde avec un diamètre de 60 mm pour les forages SC05-6-7-8 et une sonde avec un diamètre de 90 mm pour les forages SC08-9. Le forage SC08 servant d'intermédiaire pour faire le lien entre les sondes à 60 et 90 mm. Pour chaque sondage, la donnée brute consiste en une distribution à chaque profondeur des temps de relaxations T_2 avec les teneurs en eau partielles. Cette distribution est coupée à 3 ms et 100 ms pour définir trois types de teneurs en eau associées : l'eau des argiles « BNMR clay water » pour l'intervalle $T_2 < 3$ ms, l'eau liée « BNMR bound water » pour l'intervalle $3 \text{ ms} < T_2 < 100 \text{ ms}$ et l'eau mobile « BNMR moveable water content » pour l'intervalle $100 \text{ ms} < T_2$. Les dénominations en anglais seront utilisées pour la suite et jusqu'à la fin du document. La valeur moyenne logarithmique T_{2ML} pondérée par les teneurs en eau partielles est calculée pour chaque distribution de temps de relaxation T_2 permettant d'obtenir une courbe T_{2ML} en fonction de la profondeur pour chaque sondage. La Figure 3.17 présente les sondages de teneurs en eau cumulée des forages SC05-6-7-8-9 mesurés avec les sondes de 60 mm et 90 mm de diamètre.

D'après la Figure 3.17, les sondages SC08 et SC09 mesurés avec les sondes 90 mm ont une part importante de sections qui sont trop bruitées ou de mauvaise qualité. Deux facteurs influent sur le rapport signal sur bruit : (1) le diamètre de l'ensemble aimant + bobine de la sonde. Plus celui-ci augmente et plus le rapport signal sur bruit augmente. Dans ce cas, on s'attendrait à des sondages de meilleur qualité avec la sonde à 90 mm. (2) La fréquence utilisée. Le rapport signal sur bruit diminue avec l'augmentation de la fréquence. Les fréquences exactes utilisées ne sont pas connues et il est possible que la sonde à 90 mm ait une fréquence plus faible pour viser un volume d'investigation plus élevé. La Figure 3.17 montre que les sondages à 90 mm sont plus bruités que les sondages à 60 mm. Les premiers sont considérés comme non exploitables et ne seront pas interprétés par la suite (rapport d'acquisition BRGM RP-72842-FR).

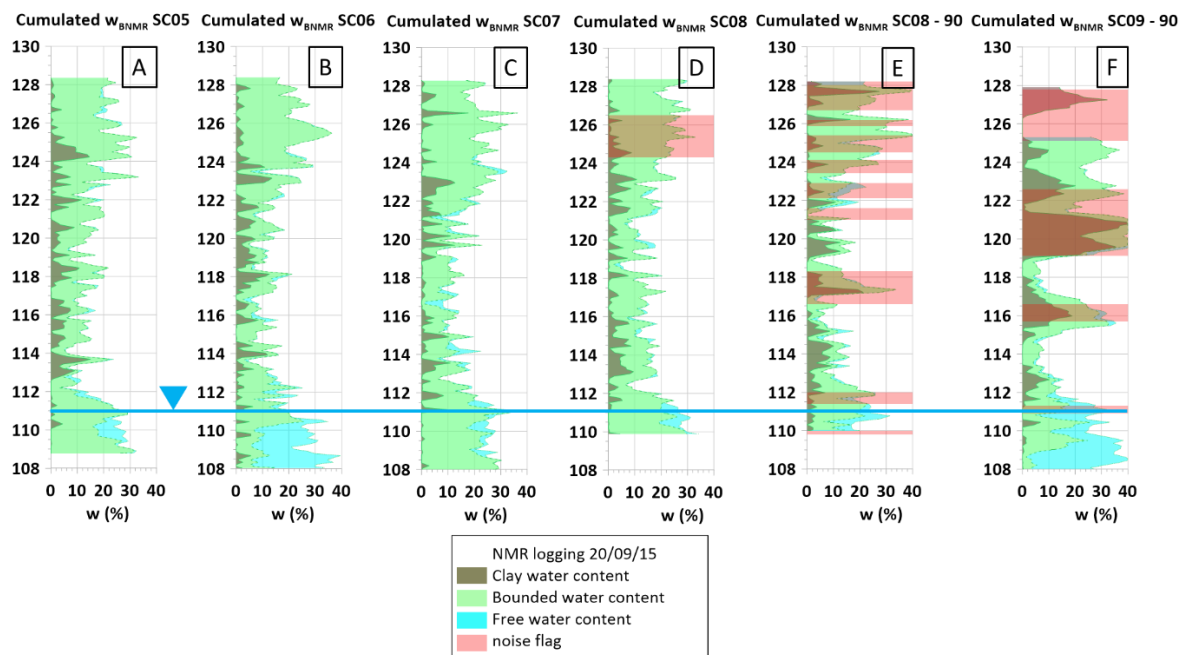


Figure 3.17 : Distributions des teneur en eau BNMR pour les sondages SC05-6-7-8 mesurés avec la sonde de 60 mm (A-D) et pour les sondages SC08-9 mesurés avec la sonde de 90 mm (E-F). Les plages en rouge représentent les profondeurs pour lesquelles les mesures sont trop bruitées ou de mauvaise qualité et donc non interprétables (rapport d'acquisition BRGM RP-72842-FR).

3.3.2 Résultats et teneur en eau BNMR

La Figure 3.18 présente les logs SC05-6-7-8 des distributions de teneur en eau BNMR (A-D), les logs SC05-6-7-8 de teneurs en eau totales BNMR (E) et de T_{2ML} (F). D'après la Figure 3.18.E, les sondages ont tous une teneur en eau totale BNMR similaire avec :

- (1) Une teneur en eau totale BNMR élevée de 20-30 % (130 – 124 m) suivi d'une baisse de la teneur en eau à une valeur moyenne de 12 % (124 – 120 m)
- (2) Une teneur en eau totale BNMR stable avec une valeur moyenne de 12 % (120 – 112 m)
- (3) Une augmentation progressive de la teneur en eau totale BNMR de 112 m à la base du forage jusqu'à une valeur moyenne de 26 % dans la zone saturée.

Les Figure 3.18.A à D montrent que les distributions de teneurs en eau BNMR dans la ZNS sont également similaires pour tous les sondages.

Dans la zone saturée, les sondages SC05-7-8 ont une distribution similaire de teneurs en eau BNMR avec une composante « bound water » majoritaire. Cela se traduit par une valeur moyenne T_{2ML} de 35 ms dans la zone saturée (Figure 3.18.F). Le sondage SC06 se distingue dans la zone saturée avec une teneur en eau composée majoritairement de « moveable water » (Figure 3.18.B) se traduisant par une valeur moyenne T_{2ML} de 165 ms dans la zone saturée (Figure 3.18.F).

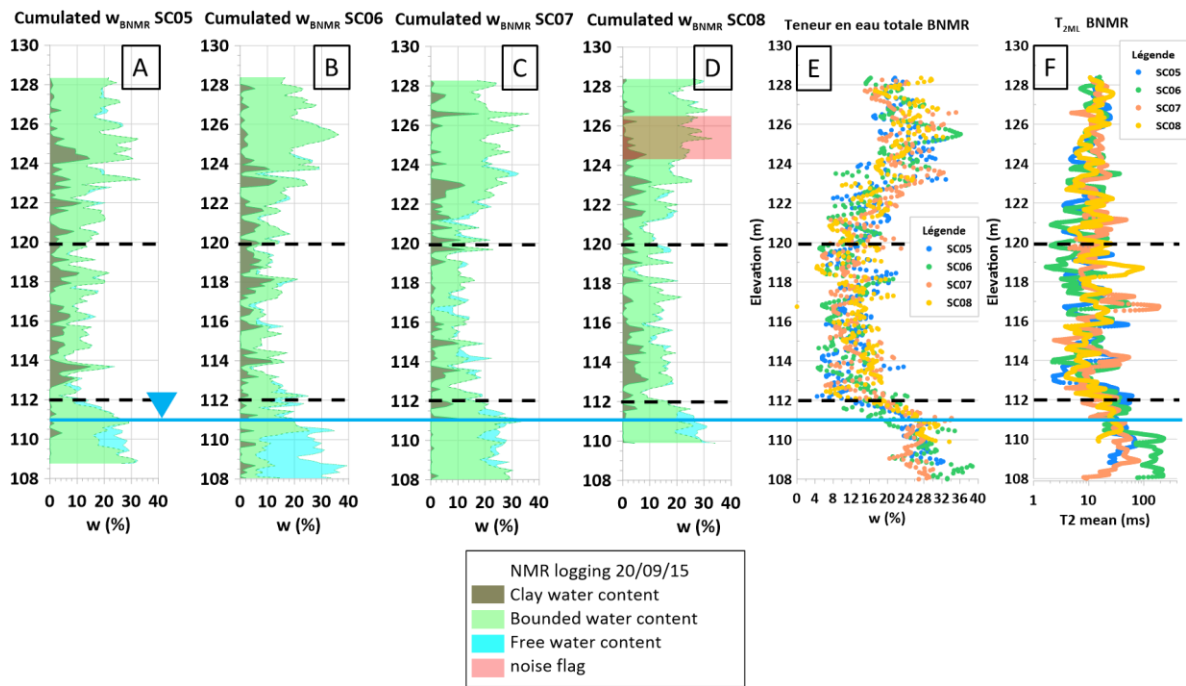


Figure 3.18 : Logs SC05-6-7-8 des distributions de teneur en eau BNMR (A-D), les logs SC05-6-7-8 de teneurs en eau totales BNMR (E) et de T_{2ML} (F). Les données ont toutes été mesurées avec la sonde à 60 mm. La ligne bleu est le niveau piézométrique.

Une différence de valeur T_{2ML} peut être interprétée comme une différence moyenne de taille des pores dans le milieu. Dans le cas du log SC06 par rapport aux logs SC05-7-8 dans la zone saturée (Figure 3.18.F), on interprète le calcaire saturé de SC06 comme ayant une porosité de plus grande taille par exemple avec plus de fracturation et de karstification que le calcaire saturé de SC05-7-8 qui serait moins fracturé. Cela est cohérent avec une prépondérance de « moveable water » en SC06 qu'en SC05-7-8.

Chapitre 3.4 : Données électriques

3.4.1 Modèle 3D ERT/IP

Acquisition, filtrage et inversion

L'acquisition des données électriques a consisté en 8 profils de 48 électrodes avec un spacing de 2.5 m entre les électrodes et de 5 m entre les profils (Figure 3.1). Les mesures sont faites avec une configuration dipole-dipole en 3D et avec les appareils Syscal Pro et Syscal Pro Switch (IRIS Instrument). Les pulses injectés avaient un voltage maximal de 800 V injecté pendant 2 s avec un total de 4 cycles de mesures.

Les données ont été filtrées avec le logiciel Prosys II (IRIS Instrument) et un code Matlab développé au BRGM (J. Deparis, communication personnelle) a été utilisé pour filtrer les données IP. Le jeu de données 3D a été inversé en 3D avec le code open source BERT 3D. Le modèle inversé de résistivité électrique a une erreur RMS de 7 %. Plus de précisions sur l'acquisition, le filtrage et l'inversion des données électriques sont données dans le rapport BRGM RP-72842-FR.

Résultats

La Figure 3.19 présente deux sections horizontales des modèles 3D de résistivité électrique et de chargeabilité. La première située dans la ZNS à une élévation de 120 m et la seconde dans la zone saturée à une élévation de 110 m. A 120 m dans la ZNS, à l'exception des extrémités au nord et au sud, la résistivité électrique a une valeur moyenne de 250 $\Omega.m$, avec une anomalie de 120 – 160 $\Omega.m$ dans la zone Z2. De même, à l'exception des extrémités au nord et au sud, la chargeabilité a une valeur moyenne de 1.5 mV/V avec une anomalie de 2 – 2.6 mV/V dans la zone Z2. Les anomalies de résistivité électriques et de chargeabilité sont cohérentes spatialement dans la ZNS et permettent de définir la zone Z2 (Figure 3.19). Ainsi, la zone Z1 a une résistivité électrique élevée et une faible chargeabilité alors que la zone Z2 a une résistivité électrique plus faible et une chargeabilité plus élevée que la zone Z1. Dans un contexte de milieu calcaire non saturé, on interprète la zone Z1 comme un calcaire fracturé et altéré et la zone Z2 comme un calcaire fracturé, plus altéré et plus argileux. A 110 m dans la zone saturée, on n'observe pas de variations ni de résistivité électrique ni de chargeabilité, qui sont homogènes avec des valeurs moyennes respectives de 400 $\Omega.m$ et 1 mV/V. Pour préciser les observations et les limites de l'anomalie identifiée dans la ZNS, la Figure 3.20 présente une section verticale du modèle 3D à la position définie dans la Figure 3.19 qui recoupe le modèle 3D et plusieurs forages.

Dans la ZNS, les sections verticales 2D de résistivité électrique et de chargeabilité (Figure 3.20) montrent :

- Une couche conductrice et chargeable avec une résistivité électrique inférieure à 150 $\Omega.m$ et une chargeabilité supérieure à 3 mV/V. Cette couche montre un approfondissement significatif en Z2 constituant une anomalie. Les logs BER confirment cet approfondissement.

- Cette couche conductrice recouvre une couche plus résistante ($400 \Omega.m$) et moins chargeable (chargeabilité inférieure à 1 mV/V) de 125-118 m à la base de la section sans changement significatif dans la zone saturée.

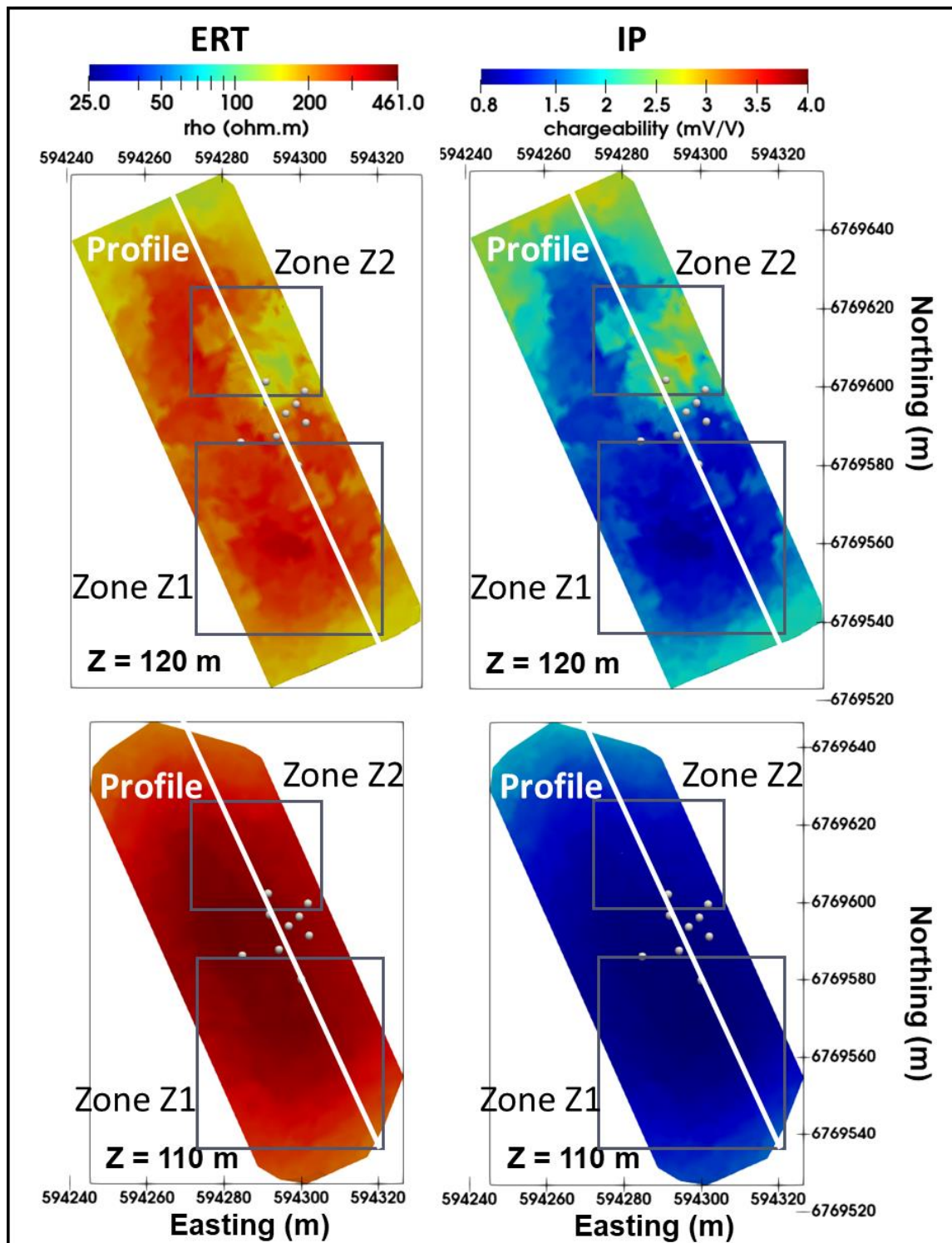


Figure 3.19 : Sections horizontales du modèle 3D de résistivité électrique (gauche) et de chargeabilité (droit) dans la ZNS à 120 m (haut) et dans la zone saturée à 110 m (bas). Les points blancs indiquent la position des forages. Les rectangles gris représentent les zones 1 et 2. Le trait blanc représente la trace de la section verticale interprétée par la suite. Extrait de Ryckebusch et al., (2024).

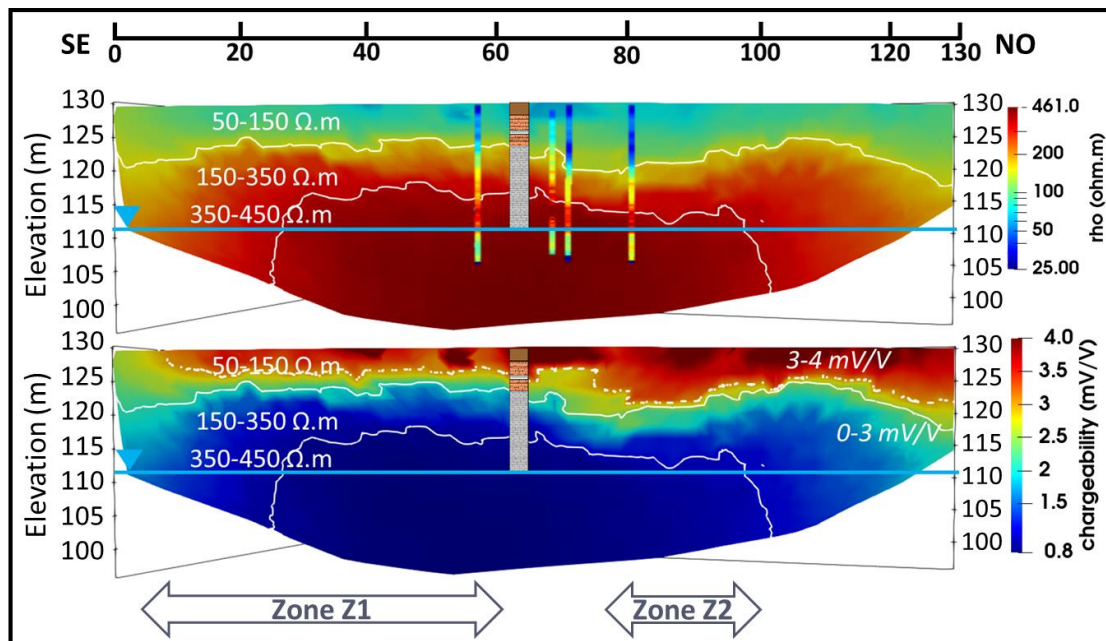


Figure 3.20 : Section verticale de résistivité électrique (haut) avec les logs BER (de gauche à droite : SC06-SC05-SC07-SC09) et de chargeabilité (bas), extraits du modèle 3D électrique. La ligne bleue est le niveau piézométrique. Les lignes blanches sont les iso-lignes de résistivité électriques à 150 $\Omega.m$ et 350 $\Omega.m$ et la ligne blanche en tiret est l'iso-ligne de chargeabilité à 3 mV/V. Extrait de Ryckebusch et al., (2024).

On interprète la couche conductrice comme un calcaire argileux et/ou altéré avec un accroissement d'altération et de la teneur en argile en Z2 qui explique l'approfondissement de la couche conductrice et chargeable.

3.4.2 Données BER et densité en forage

Acquisition et traitement des données

Les mesures de résistivité électrique (BER) et de densité gamma-gamma ont été faite par l'entreprise SEMM Logging dans les forages SC05-6-7-8-9. Pour la mesure BER, la sonde utilisée a un diamètre de 38 mm avec deux espacements de boucles respectivement de 510 mm et 810 mm. Pour chaque forage, les courbes à espacement court et long ont été mesurées. A cause d'effets de forages (cavage) et d'une faible sensibilité de la sonde aux résistivités élevées, les données à espacement court sont bruitées et seules les données à espacement long seront valorisées.

Résultats

La Figure 3.21 présente les logs 1D BER et de densité mesurés dans les forages SC05-6-7-8-9. On identifie trois couches avec trois comportements différents :

- (1) De 130 m à 120 m, pour SC05-6-8, on observe une augmentation continue de la résistivité électrique (50 - 150 $\Omega.m$). Pour SC07-9, la résistivité électrique est relativement stable autour de 40 $\Omega.m$ entre 130 m et 124 m, suivi par une augmentation à 150 $\Omega.m$ plus profonde que pour SC06. Pour tous les forages, on observe une augmentation de la densité de 1.5 à plus de 2 g.cm⁻³.

- (2) De 120 m à 112 m, pour tous les forages, on observe une légère augmentation BER (140 - 160 $\Omega.m$) de 120 m à 116 m, suivi d'une valeur constante à 200-300 $\Omega.m$ de 116 m à 112 m et une valeur constante de densité (valeur moyenne de 2.2 $g.cm^{-3}$).
- (3) De 112 m à la base du forage, on observe une baisse importante de la résistivité électrique descendant dans la zone saturée à 100 $\Omega.m$ pour SC06, à 120 $\Omega.m$ pour SC05-7-8 et à 140 $\Omega.m$ pour SC09. On observe une baisse de densité à 2 $g.cm^{-3}$ juste au-dessus du niveau piézométrique et des variations plus larges dans la zone saturée.

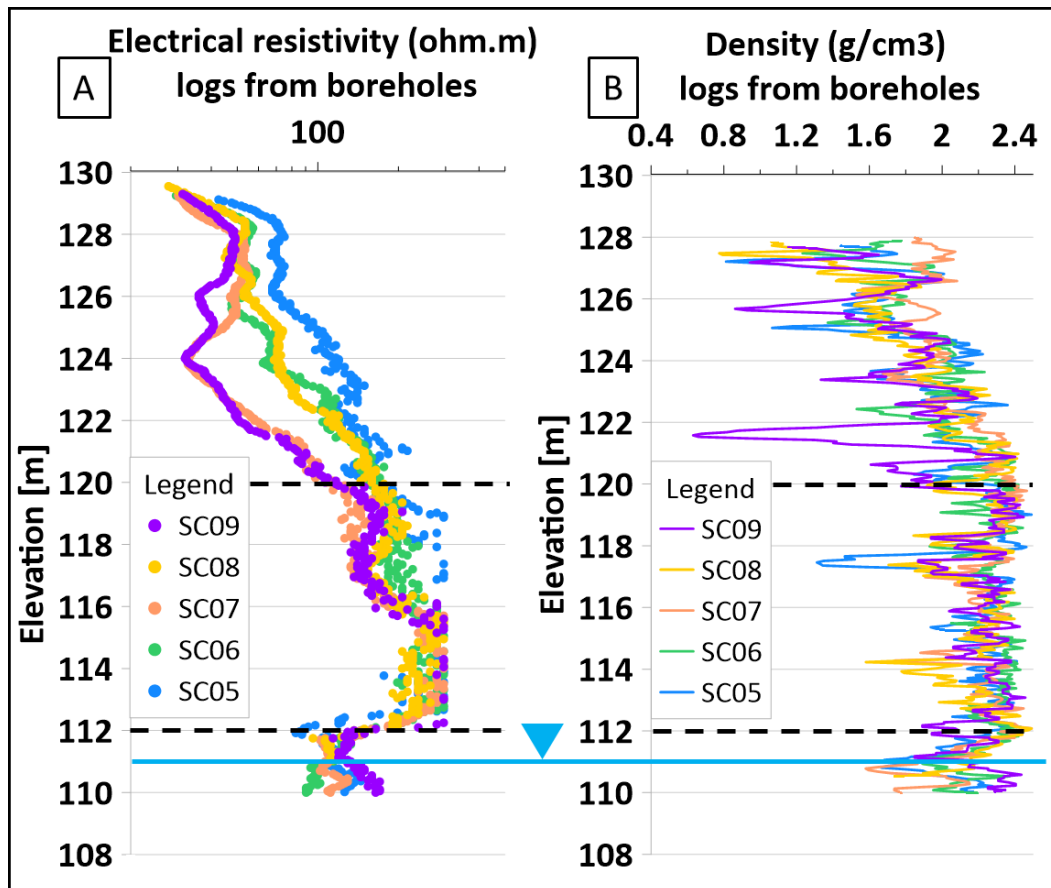


Figure 3.21 : (A) Logs BER des forages SC05-6-7-8-9. Les résistivités électriques supérieures à 300 $\Omega.m$ sont en dehors de la gamme de sensibilité de la sonde et ne sont pas présentées. (B) Logs de densité des forages SC05-6-7-8-9. Les lignes traits tiret noires représentent les limites de couches interprétées et la ligne bleue représente le niveau piézométrique.

On interprète la couche (1) conductrice comme un calcaire altéré et argileux, avec un approfondissement aux niveaux des forages SC07 et SC09. Cet approfondissement est cohérent avec celui observé en ERT sur le modèle 3D. La couche (2) est interprétée comme un calcaire plus cohérent, dense et massif (moins poreux) qui explique la densité et la résistivité électrique plus élevée. La couche (3) est interprétée comme un calcaire fracturé moins dense que la couche (2) et avec une porosité plus élevée qui explique la baisse de densité. Dans la zone saturée, on interprète la variabilité des valeurs de densité et de résistivité électrique comme une variabilité de la porosité dans les calcaires, associée à de la fracturation voir de la karstification pour SC06 qui a la résistivité électrique la plus faible.

Chapitre 3.5 : Comparaison des résultats géophysiques et inter-corrélations

3.5.1 Echelle décamétrique

Ré-échantillonnage des modèles 3D

A l'échelle multi-décamétrique, deux modèles 3D sont valorisés avec des tailles et échantillonnages différents (Figure 3.22.A): (1) Un modèle 3D de teneur en eau SNMR, avec un jeu de données composé de points (X, Y, Z, teneur en eau). (2) Un modèle 3D de résistivité électrique et de chargeabilité avec un jeu de données composé de cellules tétraédriques comprenant chacune une valeur de résistivité électrique et de chargeabilité, elles-mêmes définies par quatre sommets et leurs coordonnées (X, Y, Z). Ce modèle a également un paramètre de sensibilité calculé avec le code BERT pendant l'inversion. Le modèle est coupé au seuil de sensibilité de 10^{-2} et les valeurs inférieures à ce seuil ne sont ni présentées, ni interprétées. Pour pouvoir faire une interprétation jointe de ces deux modèles et en extraire une information commune, j'ai écrit un script Python pour ré-échantillonner les deux modèles en un seul modèle 3D à trois paramètres : teneur en eau SNMR, résistivité électrique et chargeabilité. Ce modèle 3D a le volume du modèle 3D de résistivité électrique. Les différentes étapes du script sont les suivantes :

- Etape 1 : Sélection des points du modèle SNMR qui sont dans le volume du modèle électrique
- Etape 2 : Association de la valeur résistivité électrique et chargeabilité correspondante à chaque point SNMR : Chaque point SNMR est associé au point sommet électrique le plus proche, lui-même associé à plusieurs cellules. Il y a donc ici un point SNMR pour plusieurs cellules tétraédriques électriques. Pour chaque cellule, un calcul de position est fait pour déterminer si le point SNMR est dans ou en dehors de la cellule. Ce procédé permet d'identifier la cellule tétraédrique électrique dans laquelle se trouve le point SNMR. Ensuite, les valeurs de résistivité électrique et chargeabilité de la cellule sont associées au point SNMR.
- Etape 3 : Interpolation en un volume 3D : Le jeu de données final est composé de points (X, Y, Z, teneur en eau SNMR, résistivité électrique, chargeabilité) interpolés dans un volume 3D (Figure 3.22.B).

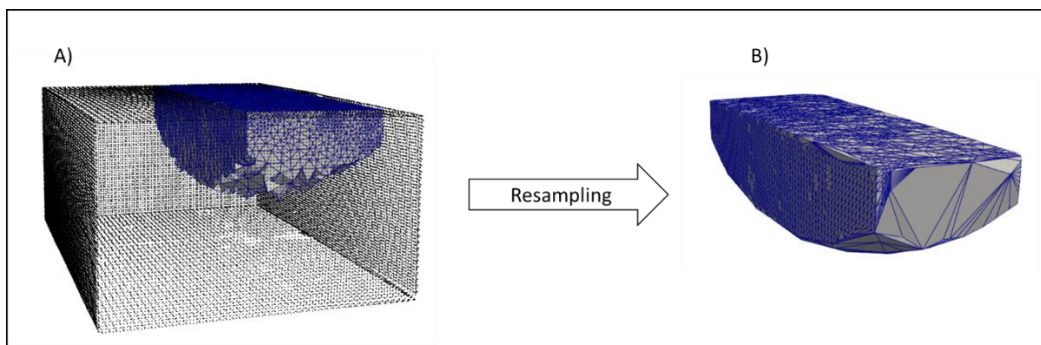


Figure 3.22 : Ré-échantillonnage (A) du modèle 3D de teneur en eau SNMR (points noirs) et du modèle 3D ERT/IP (cellules bleues) en (B) un modèle 3D à trois paramètres : teneur en eau SNMR, résistivité électrique, chargeabilité.

Interprétation jointe du modèle 3D SNMR/ERT/IP

La Figure 3.23 présente les sections horizontales à 120 m (ZNS) et à 110 m du modèle 3D SNMR/ERT/IP.

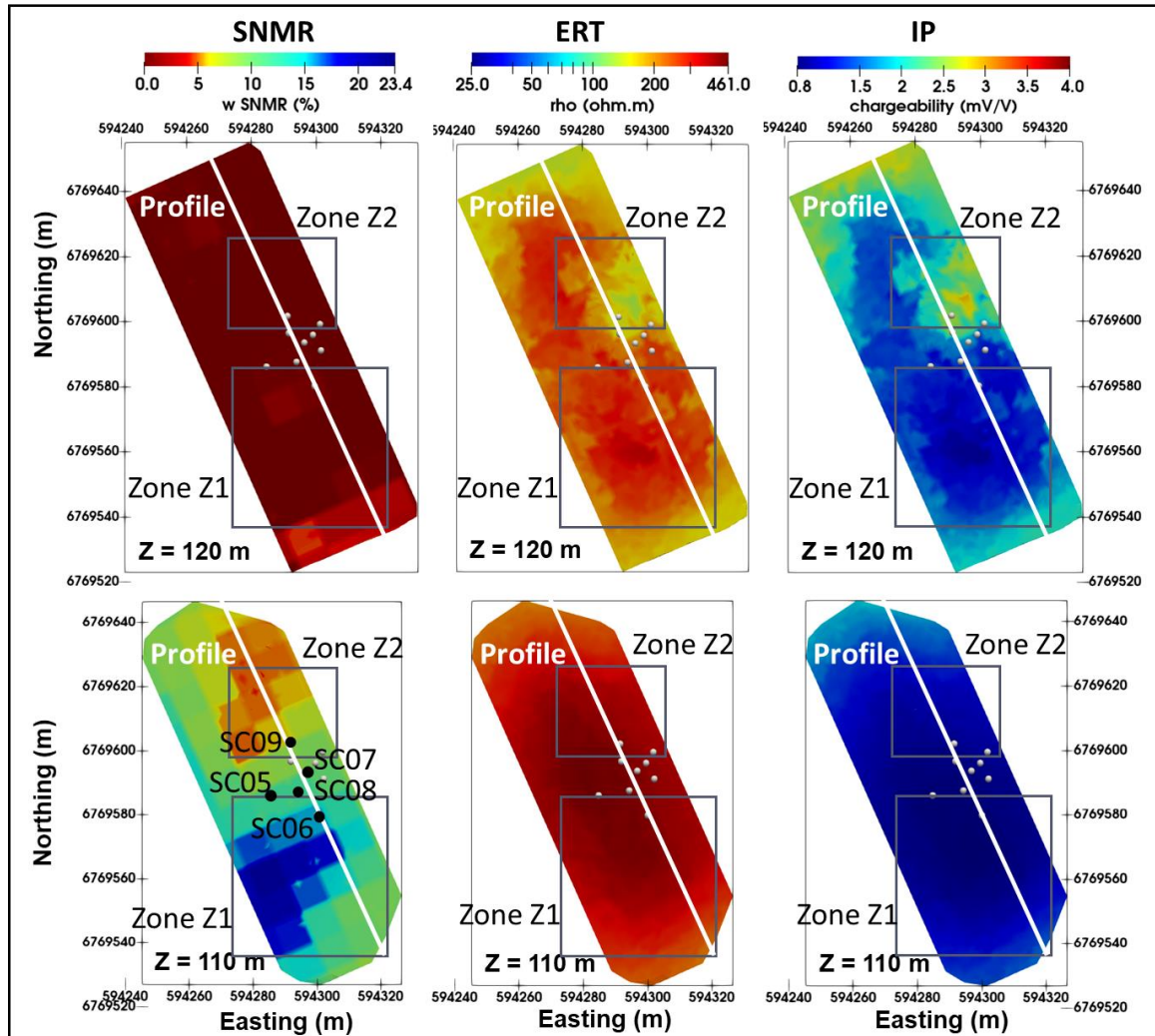


Figure 3.23 : Sections horizontales du modèle 3D dans la ZNS à une élévation de 120 m (haut) et dans la zone saturée à une élévation de 110 m (bas). Les paramètres sont la teneur en eau SNMR (gauche), la résistivité électrique (milieu) et la chargeabilité (droite). Les points blancs représentent la position des forages. Les rectangles gris représentent les délimitations des zones Z1 et Z2 avec des anomalies. Les forages dont les données sont valorisées (SC05-6-7-8-9) sont représentés avec des points noirs sur la section de teneur en eau SNMR à 110 m (Ryckebusch et al., 2024).

On observe d'abord que les zones Z1 et Z2 présentant des anomalies coïncident spatialement et peuvent être interprétées ensemble dans le modèle commun à trois paramètres. A 120 m (ZNS), comme vu précédemment :

- La teneur en eau SNMR est homogène et faible à 0 – 1 %.
- La résistivité électrique et la chargeabilité globale ont une valeur moyenne respective de 250 $\Omega.m$ et 1.5 mV/V, avec une anomalie plus conductrice et chargeable dans la zone Z2.

La zone Z1 a une faible teneur en eau SNMR, une résistivité électrique élevée et une chargeabilité faible, interprétée comme un calcaire altéré et fracturé. La zone Z2 a une faible teneur en eau SNMR, une résistivité électrique plus faible et une chargeabilité plus élevée, interprétée comme un calcaire fracturé plus altéré et argileux.

A 110 m (zone saturée), comme vu précédemment :

- Les résistivités électriques et les chargeabilités sont homogènes respectivement à 400 $\Omega.m$ et 1 mV/V.
- La teneur en eau SNMR moyenne est de 10 % avec des teneurs en eau respectivement plus élevées et plus faibles dans les zones Z1 et Z2. Ces variations sont également observées avec la constante de temps de relaxation T_2^* . Ces variations ont été interprétées comme des variations de porosités associées à des variations de niveau de fracturation avec en Z1 un calcaire fracturé/karstifié et en Z2 un calcaire moins fracturé et moins poreux.

Cette interprétation explique les variations de teneur en eau SNMR. Cependant, elle n'est pas cohérente avec les données électriques car il n'y a pas d'anomalies dans la zone saturée où l'on s'attendrait à observer une baisse de résistivité associée à une augmentation de la porosité de fractures.

La Figure 3.24 présente les sections verticales de teneur en eau SNMR, résistivité électrique et chargeabilité à la position du profil (Figure 3.23) recoupant le modèle 3D et la zone des forages.

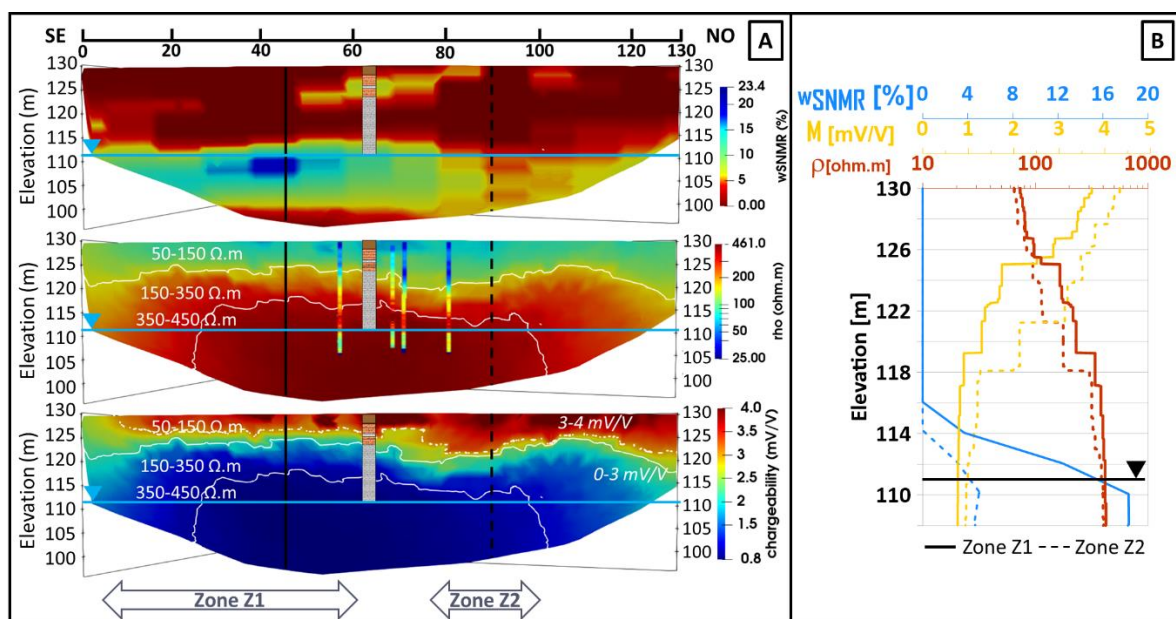


Figure 3.24 : (A) section verticale de teneur en eau SNMR (haut), résistivité électrique avec les logs BER (de gauche à droite : SC06-5-7-9) (milieu), chargeabilité (bas) extraits du modèle 3D. La ligne bleue est le niveau piézométrique. Les flèches grises représentent les positions des zones Z1 et Z2 (Figure 3.23). Les lignes noires en trait plein et trait tiret représentent respectivement les positions des logs 1D extraits de la section verticale 2D dans chaque zone. Les lignes blanches pleines sont les iso-lignes de résistivité électrique à 150 $\Omega.m$ et 350 $\Omega.m$ et la ligne blanche trait tiret est l'iso-ligne de chargeabilité à 3 mV/V. (B) Logs 1D de teneur en eau SNMR, résistivité électrique et chargeabilité, extraits de la section verticale 2D respectivement dans la zone Z1 (trait plein) et Z2 (trait tiret). La ligne noire représente le niveau piézométrique (Ryckebusch et al., 2024).

Dans la ZNS, comme interprétées précédemment, les sections électriques montrent :

- Une couverture conductrice, chargeable avec un approfondissement dans la zone Z2. La limite basse de l'approfondissement est définie avec les logs BER à 118 m interprétée comme un calcaire fracturé, altéré et argileux avec un approfondissement et une augmentation de l'argilosité en Z2.
- La couverture conductrice recouvre une couche plus résistante, moins chargeable, de 125-118 m à la base des sections sans changement visible sous le niveau piézométrique. Cette couche est interprétée comme un calcaire fracturé. Dans la partie non saturée de cette couche résistante, la teneur en eau SNMR augmente progressivement jusqu'à la zone saturée, expliquée par l'eau de rétention et la frange capillaire dans la ZNS et un lissage de la courbe associée à l'inversion du toit de la couche d'eau SNMR (zone saturée). Dans la partie saturée de cette couche, la SNMR distingue les zones Z1 et Z2 avec des variations de teneur en eau interprétées comme des variations de niveaux de porosité associée à de la fracturation dans les calcaires.

Sur ce modèle, les méthodes électriques et SNMR se complètent en permettent une interprétation des anomalies géophysiques à des profondeurs différentes : l'ERT et IP en ZNS et la SNMR en zone saturée et ainsi proposer une interprétation lithologique complète sur l'ensemble de la section verticale.

3.5.2 Echelle décimétrique (forage)

Inter-corrélations des résultats de forage BNMR/BER et densité

La Figure 3.25 présente les logs BER, densité, teneur en eau totale BNMR et T_{2ML} BNMR tenant compte des zones définies précédemment à partir du modèle 3D avec les forages SC06 (zone Z1), SC09 (zone Z2) et SC05-7-8 en dehors des zones Z1 et Z2 dans une zone intermédiaire (zone Zi). Chacun des jeux de données était interprétés séparément jusqu'à présent. En harmonisant les interprétations, on distingue trois couches :

- (1) De 128 m à 120 m, avec pour tous les forages une teneur en eau totale BNMR élevée de 20-30 % (130 – 124 m) suivi d'une baisse à une valeur moyenne de 12 % (124 – 120 m). Pour les forages en Z1 (SC06) et partiellement en Zi (SC05-8), on observe une augmentation continue de la résistivité électrique (50 - 150 $\Omega.m$). Pour les forages en Z2 (SC09) et partiellement en Zi (SC07), la résistivité électrique est relativement stable autour de 40 $\Omega.m$ entre 130 m et 124 m, suivi par une augmentation à 150 $\Omega.m$ plus profonde que pour SC06. Pour tous les forages, on observe une augmentation de la densité de 1.5 à plus de 2 $g.cm^{-3}$.
- (2) De 120 m à 112 m, avec une teneur en eau totale BNMR stable pour tous les forages avec une valeur moyenne de 12 %. Une légère augmentation BER (140 à 160 $\Omega.m$) de 120 m à 116 m, suivi d'une valeur constante à 200-300 $\Omega.m$ de 116 m à 112 m et une valeur constante de densité (valeur moyenne de 2.2 $g.cm^{-3}$).

- (3) De 112 m à la base des forages, on observe une augmentation progressive de la teneur en eau totale BNMR de 112 m à la base du forage jusqu'à une valeur moyenne de 26 % dans la zone saturée. Il y a cependant une variabilité des valeurs de T_{2ML} dans la zone saturée avec une valeur moyenne de 165 ms pour SC06 (Z1), traduit par une eau majoritairement « moveable » et de 35 ms pour SC05-7-8 (Zi), traduit par une eau majoritairement « bound ». On observe une baisse importante de la résistivité électrique descendant dans la zone saturée à 100 Ω.m pour SC06, à 120 Ω.m pour SC05-7-8 et à 140 Ω.m pour SC09. On observe une baisse de densité à 2 g.cm⁻³ au-dessus du niveau piézométrique et des variations plus larges dans la zone saturée.

En corrélant les observations BER, BNMR et de densité, on interprète la couche (1) comme un calcaire altéré et argileux avec un approfondissement en Z2 et partiellement Zi (SC07) de la couche conductrice interprétée comme plus argileuse, en cohérence avec l'interprétation à échelle décimétrique. La teneur en eau BNMR élevée dans cette couche suggère l'hypothèse de la présence d'une nappe perchée très localement en Z2, associée à une argilosité plus élevée dans le calcaire à cette profondeur. On interprète la couche (2) comme un calcaire plus cohérent, dense et massif. On interprète la couche (3) comme un calcaire moins dense et plus poreux que la couche (2) avec une augmentation de la fracturation, elle-même variable avec pour SC06 (Z1) une fracturation et karstification plus importante que pour SC05-7-8 (Zi) et SC09 (Z2), moins poreux et fracturés.

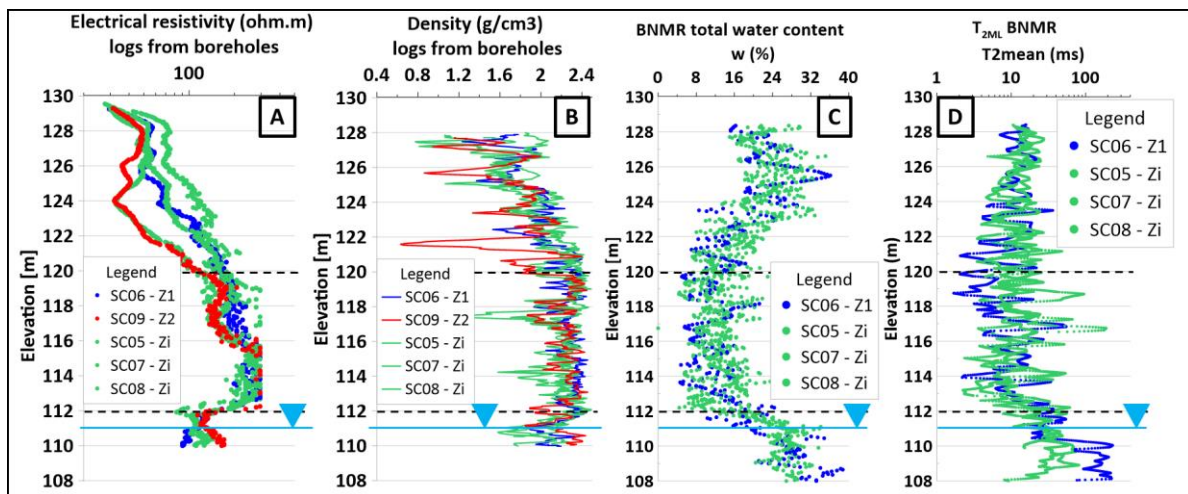


Figure 3.25 : Logs des forages SC06 (Z1, bleu), SC05-7-8 (Zi, vert) et SC09 (Z2, rouge) en (A) BER, (B) densité, (C) teneur en eau totale BNMR sans SC09 et (D) T_{2ML} BNMR sans SC09. La ligne bleue représente le niveau piézométrique et les lignes noires traits tiret représentent les limites des couches interprétées (extrait de Ryckebusch et al., 2024).

Loi d'Archie dans la zone saturée

Le Tableau 3.6 présente les valeurs moyennes calculées dans la zone saturée en Z1 (SC06) et Zi (SC05-7-8), de la teneur en eau totale BNMR et de la résistivité électrique en forage. Les porosités d'Archie ont été calculées à partir des valeurs moyennes BER et des paramètres de la loi d'Archie calculées par Abbas et al., (2022). On observe dans le Tableau 3.6 que les teneurs en eau totales BNMR et les teneurs en eau BER (= porosité BER saturée) sont proches en Z1 comme en Zi. On peut interpréter cette porosité comme de la porosité effective en zone saturée Figure 2.1. Si elle est significative, la différence, respectivement de 2 % en Z1 et de 4 % en Zi peut être expliquée par de la porosité non connectée qui contribue à la teneur en eau BNMR

mais pas à la mesure BER. Cette valeur de porosité non connectée serait cohérente avec celle mesurée par (Aldana, 2019) ($\phi_{Tot} - \Phi_c$ (%)) dans le Tableau 1.1).

		<i>BNMR total water content</i>	<i>BER ($\Omega.m$)</i>	<i>BER porosity (Archie)</i>
Aquifer	SC06 – Z1	25%	100 $\Omega.m$	23%
	SC05-7-8 – Zi	25%	120 $\Omega.m$	21%

Tableau 3.6 : Dans la zone saturée, teneur en eau totale BNMR comparée à la porosité d'Archie calculée à partir des valeurs moyennes BER et des paramètres de la Loi d'Archie calculés par Abbas et al., (2022) pour les calcaires fractures saturés d'OZNS (Ryckebusch et al., 2024).

3.5.3 Multi-échelle

Log BER et modèle ERT 3D

Une des observations faites sur le modèle 3D ERT est l'absence de changement de valeur, et particulièrement de baisse de résistivité, lors du passage de la ZNS à la zone saturée. C'est l'une des incohérences avec les données BER à l'échelle forage pour lesquelles la baisse de résistivité marque clairement le passage dans la zone saturée et ce pour tous les forages. Deux hypothèses sont proposées pour expliquer cette absence de transition : (1) Une profondeur située sous la profondeur d'investigation, en effet la mesure a été configurée pour imager principalement la zone non saturée et non la zone saturée. (2) Un manque de résolution du modèle ERT 3D à cette profondeur pour inverser la couche conductrice représentée par la zone saturée.

Pour tester la première hypothèse d'une profondeur sous la profondeur d'investigation, un second profil ERT deux fois plus long (96 électrodes avec un espacement de 2.5 m) que celui du modèle 3D (48 électrodes avec un espacement de 2.5 m) a été mesuré au même endroit. La Figure 3.26 présente les deux profils et les données BER. Sur la Figure 3.26.B, correspondant au profil plus long, on observe également une absence de baisse de résistivité lors du passage de la ZNS à la zone saturée contrairement aux données BER. Cela écarte la première hypothèse d'une profondeur sous la profondeur d'investigation de l'ERT dans le modèle 3D.

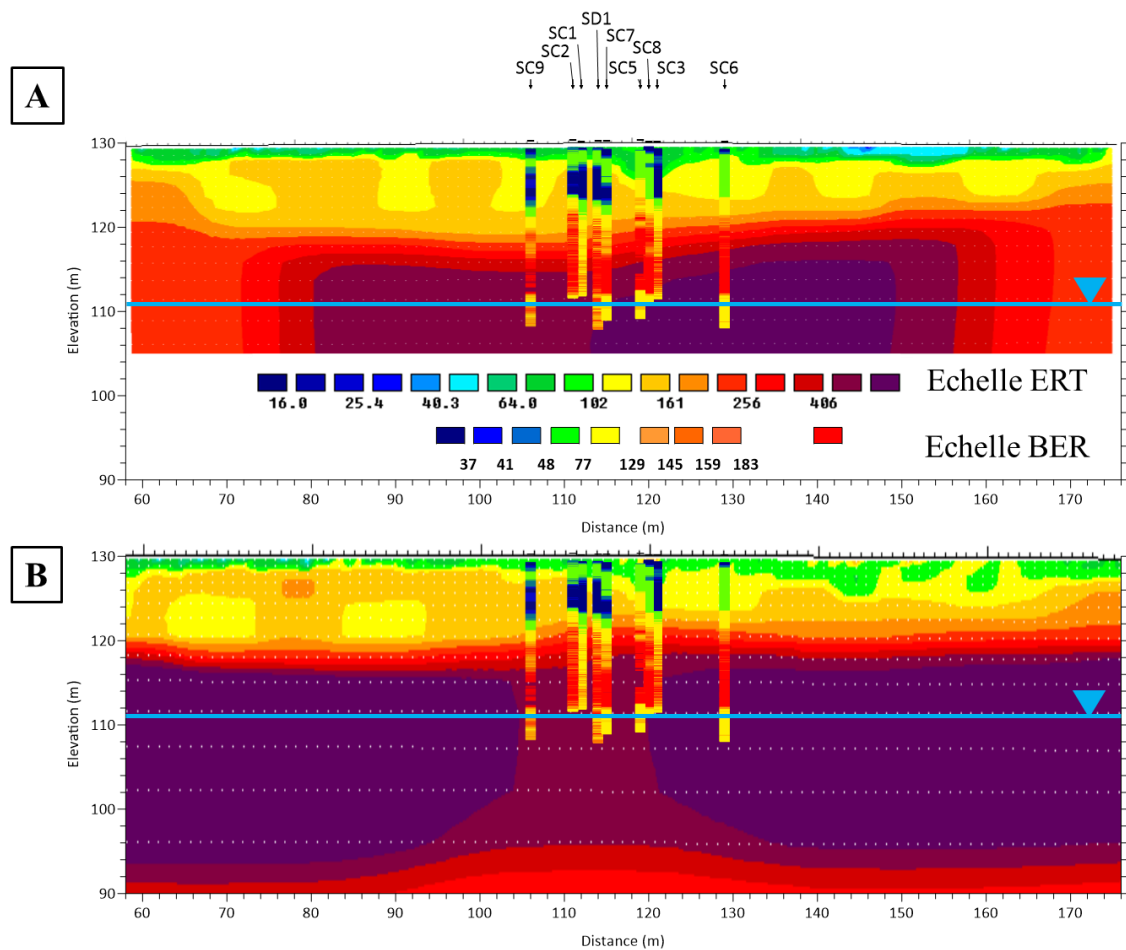


Figure 3.26 : (A) Section verticale extraite du modèle ERT 3D et les forages BER. (B) Profil ERT deux fois plus long et coupé à la position de la section verticale en (A) pour la comparaison. Noter que les échelles de couleur sont différentes. Celles-ci ont été choisies pour rendre visible la cohérence des variations de résistivité et non des valeurs. Les lignes bleues représentent le niveau piézométrique.

Pour tester la seconde hypothèse d'un manque de résolution à échelle décamétrique, un modèle synthétique a été construit à partir des données BER, où la transition est visible, puis inversé en ERT avec la configuration du modèle 3D. La Figure 3.27 présente les logs 1D extraits du modèle ERT 3D à la position des forages, les logs BER, le modèle synthétique construit à partir des données BER et le modèle synthétique inversé en ERT avec la configuration du modèle 3D. On observe sur la Figure 3.27.B que le modèle synthétique construit sur la base des données BER présente une transition claire dans la zone saturée avec une baisse de résistivité électrique de 250 $\Omega.m$ à 130 $\Omega.m$. Le modèle synthétique inversé en ERT ne présente lui pas de changement de valeur au passage dans la zone saturée. Cela confirme l'hypothèse d'un manque de résolution à cette profondeur ne permettant pas d'imager la couche conductrice. Cela explique également qu'elle ne soit pas visible non plus sur le profil ERT deux fois plus long (Figure 3.26).

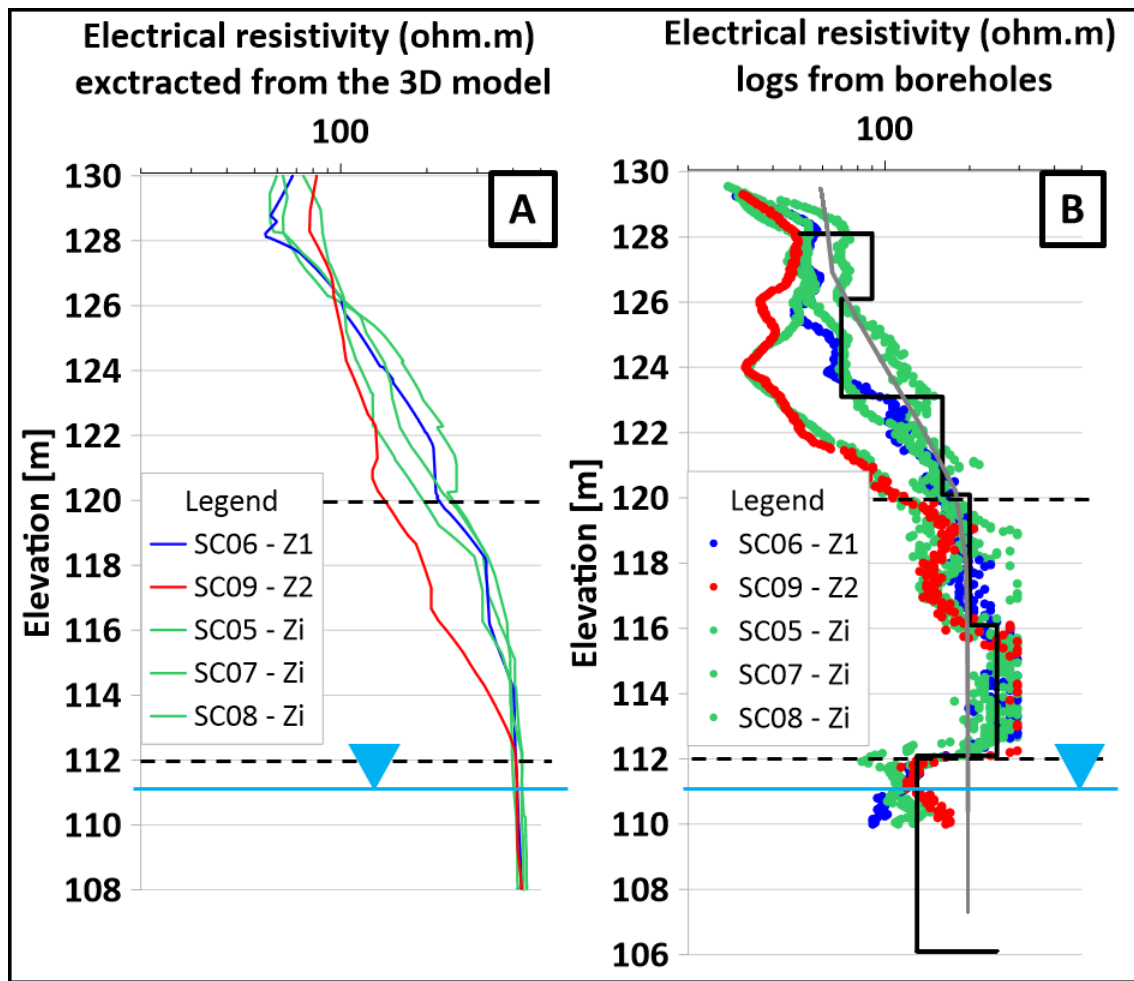


Figure 3.27 : (A) Logs 1D de résistivité électrique extraits du modèle ERT 3D à la position des forages SC05-6-7-8-9. (B) Logs BER pour les forages SC05-6-7-8-9. La ligne noire est un modèle synthétique de résistivité électrique basé sur les données BER et la ligne grise est l'inversion ERT de ce modèle synthétique. La ligne bleue est le niveau piézométrique. Les lignes noires en trait tiret sont les limites des couches interprétées.

Comparaison des teneurs en eau SNMR et BNMR

La Figure 3.28 présente les teneurs en eau BNMR cumulées des forages SC06 (Z1) et SC07 (C et D) représentatif de SC05-7-8 (Zi) avec la teneur en eau totale BNMR (B), les constantes de temps de relaxation T_{2ML} BNMR (E) et la teneur en eau SNMR (A). En SNMR, la distinction des zones Z1, Zi et Z2 est faite dans la zone saturée par une variabilité des valeurs de teneur en eau : 15 - 22 % en Z1 et 5 - 8 % en Zi (Figure 3.28.A). En BNMR, la distinction des zones Z1 et Zi est faite par la variabilité de distribution des teneurs en eau : teneur en eau majoritairement « moveable » en Z1 associée à des tailles de pores élevées et interprétées comme de la fracturation/karstification (Figure 3.28.B). Teneur en eau majoritairement « bound » en Zi interprétée comme un niveau plus faible de fracturation (Figure 3.28.C).

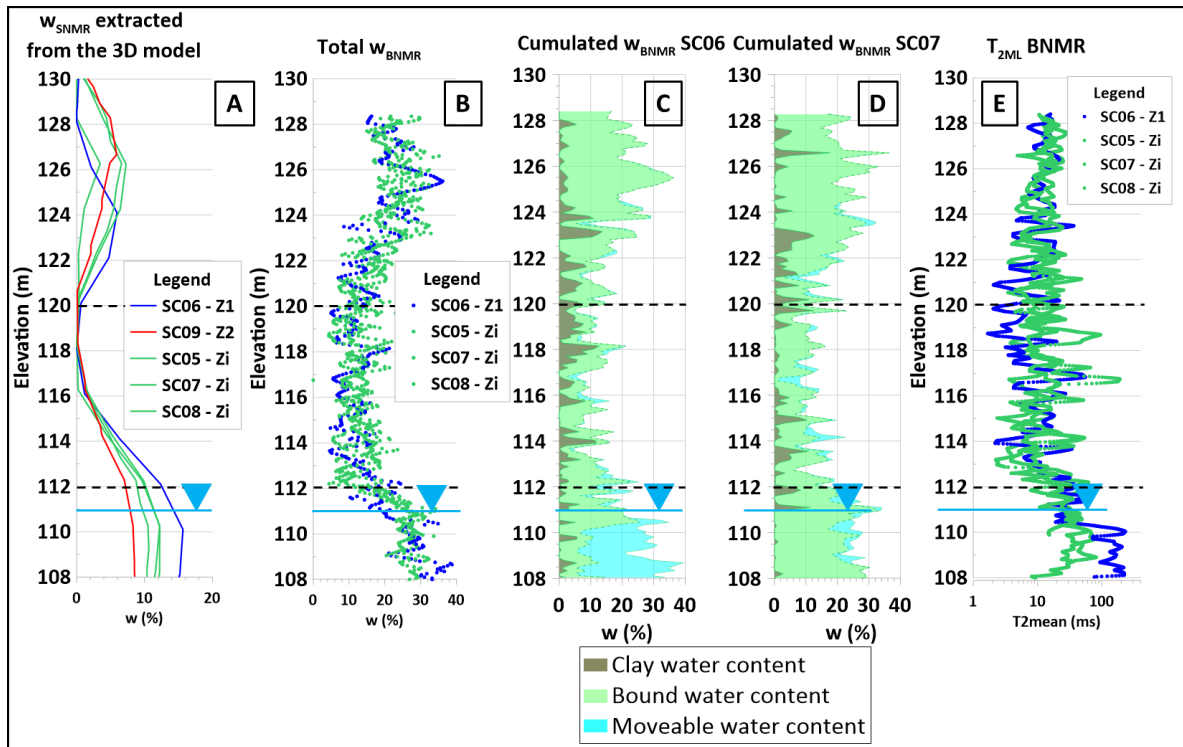


Figure 3.28 : (A) Teneur en eau SNMR extrait du modèle 3D à la position des forages SC05-6-7-8. (B) Teneur en eau totale BNMR dans les forages SC05-6-7-8. (C-D) Distribution de teneur en eau BNMR dans les forages SC06 (Z1) et SC07 représentative des forages SC05-7-8 (Zi). (E) T_{2ML} BNMR des forages SC05-6-7-8 associé à la taille moyenne des pores. La ligne bleue correspond au niveau piézométrique. Les lignes noires traits tiret correspondent aux limites des couches interprétées (Ryckebusch et al., 2024).

La Figure 3.28 montre que les teneurs en eau SNMR et BNMR ont des variations verticales similaires mais un écart de valeurs de 12 %. Sur la base de la synthèse bibliographique, l'une des hypothèses pour expliquer cet écart est le dead-time de 40 ms présent en SNMR qui ne mesure pas une partie de la teneur en eau associée aux temps de relaxations inférieurs à cette valeur.

En première approche pour tenir compte de ce dead-time, la distribution des teneurs en eau partielles pour chaque T_2 BNMR a été coupée à la limite du dead-time et les valeurs de teneur en eau totale et T_{2ML} BNMR ont été recalculés. La Figure 3.29 montre : la distribution de teneur en eau BNMR avec la part correspondante aux T_2 inférieurs à 40 ms (dead-time SNMR) (rayures rouges) pour les forages SC06 (Figure 3.29.A) et SC07 (Figure 3.29.B), les teneurs en eau totales BNMR (points), BNMR > 40 ms (ligne) et SNMR (traits tiret) (Figure 3.29.C). Bien que les teneurs en eau SNMR et BNMR ne soient pas directement comparables à cause de la complexité des différences entre les mesures, on suppose que la similarité des variations décrit le même phénomène. Cette première approche permet alors de valoriser ensemble ces teneurs en eau pour en construire un modèle commun de teneur en eau pour les calcaires de Beauce sur le site OZNS.

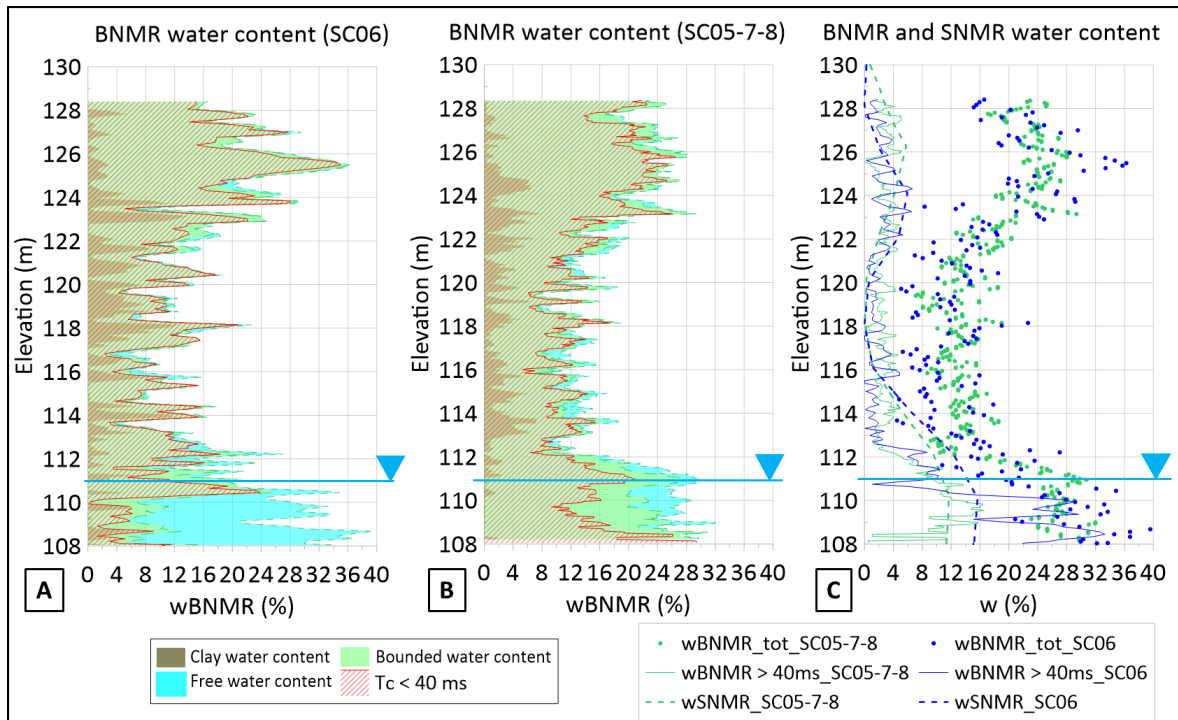


Figure 3.29 : (A) et (B) Teneur en eau distribuée BNMR et teneur en eau BNMR pour les T2 inférieures au dead-time SNMR (40 ms) pour les forages SC06 et SC05-7-8. (C) Teneur en eau totale BNMR (points), teneur en eau BNMR pour les T2 plus grand que le dead-time (40 ms) (ligne), teneur en eau SNMR (ligne traits tiret) (Ryckebusch et al., 2024).

Dans la ZNS, on observe une décroissance de la teneur en eau BNMR > 40 ms de 111 m et 113 m et des variations avec des valeurs inférieures à 5 % au-dessus de 113 m. Cette décroissance au-dessus du niveau piézométrique, que l'on interprète comme la frange capillaire, a une épaisseur de 1.5 m soit la même épaisseur que la teneur en eau simulée basée sur les mesures en laboratoire de Aldana et al., (2021). Les variations au-dessus de 113 m sont cohérentes avec l'eau de rétention modélisée dans la ZNS (Isch et al., 2022). On observe également un bon accord entre les variations de teneurs en eau SNMR et BNMR > 40 ms dans la ZNS : une décroissance au-dessus du niveau piézométrique puis des variations avec des teneurs en eau inférieures à 5 %. Dans la partie supérieure de la ZNS, on note que le maximum de teneur en eau SNMR et BNMR > 40 ms correspondent au calcaire altéré avec une teneur en argile plus élevée et possiblement un calcaire massif à sa base favorisant la présence d'une nappe perchée ou une teneur élevée en eau de rétention. On attribue la décroissance de teneur en eau SNMR au-dessus du niveau piézométrique à l'inversion et à la frange capillaire.

Dans la zone saturée, pour les forages SC05-7-8, la teneur en eau BNMR > 40 ms représente la moitié de la teneur en eau totale BNMR et la valeur est proche de la teneur en eau SNMR avec une moyenne de 12 %. Pour le forage SC06, la teneur en eau BNMR > 40 ms représente une part importante de la teneur en eau totale avec une valeur moyenne de 25 % en comparaison de la teneur en eau SNMR de 16% en moyenne. Pour expliquer cette différence entre les teneurs en eau SNMR et BNMR > 40 ms, on estime l'effet de la présence d'un karst saturé dans un volume donné, sur la teneur en eau totale par rapport au volume exploré. A l'échelle des forages, on interprète la différence de teneur en eau BNMR > 40 ms entre les forages SC06 et SC05-7-8 comme la présence d'un karst en SC06. Compte tenu du volume exploré en BNMR (quelques dm³), la différence entre une teneur en eau de 12 % (SC05-7-8) et de 25 % (SC06) représente le volume d'une sphère avec un rayon de 5 cm environ, ce qui est cohérent avec les conduits

karstiques tel qu'observé pendant le creusement du puit. A l'échelle décamétrique, par rapport au volume exploré en SNMR (supposons une boucle SNMR carré de 50 m de côté et une épaisseur de 3 m), la différence entre une teneur en eau de 12 % (SC05-7-8, volume de 900 m³) et de 15 % (SC06, volume de 1125 m³) représente un volume de 225 m³. C'est-à-dire un réseau de conduits horizontaux karstiques de 0.1 m de diamètre et de 50 m de long tous les 2.7 x 2.7 m. C'est une densité élevée mais pas irréaliste étant donné les développements karstiques observés autour du niveau de la nappe par caméra en forage. La présence de cavités karstiques saturées explique ainsi les variations de teneurs en eau mesurées aux échelles décimétriques et décamétriques.

Chapitre 3.6 : Discussion

3.6.1 Modèle lithologique du site OZNS tenant compte des hétérogénéités

Les études précédentes (Mallet et al. 2022) avaient montré la cohérence de l'imagerie tabulaire obtenue par géophysique (ERT/IP 2D/3D, sismique 2D et diagraphies de résistivité sur les trois premiers forages avec la description lithologique issue des échantillons de carotte. La structure globalement tabulaire du site était révélée ainsi qu'une anomalie conductrice et chargeable interprétée comme une lentille argileuse.

La présente étude, par une étude plus détaillée, se basant sur un jeu de données enrichi notamment d'un modèle SNMR 3D, d'un nouveau modèle ERT 3D et de nouvelles diagraphies (résistivité et densité en forage) confirme le modèle globalement tabulaire et le précise en proposant un nouveau modèle de propriétés physiques construit à partir des observations géophysiques et interprété comme des variations lithologiques en accord avec les descriptions lithologiques (Figure 3.30).

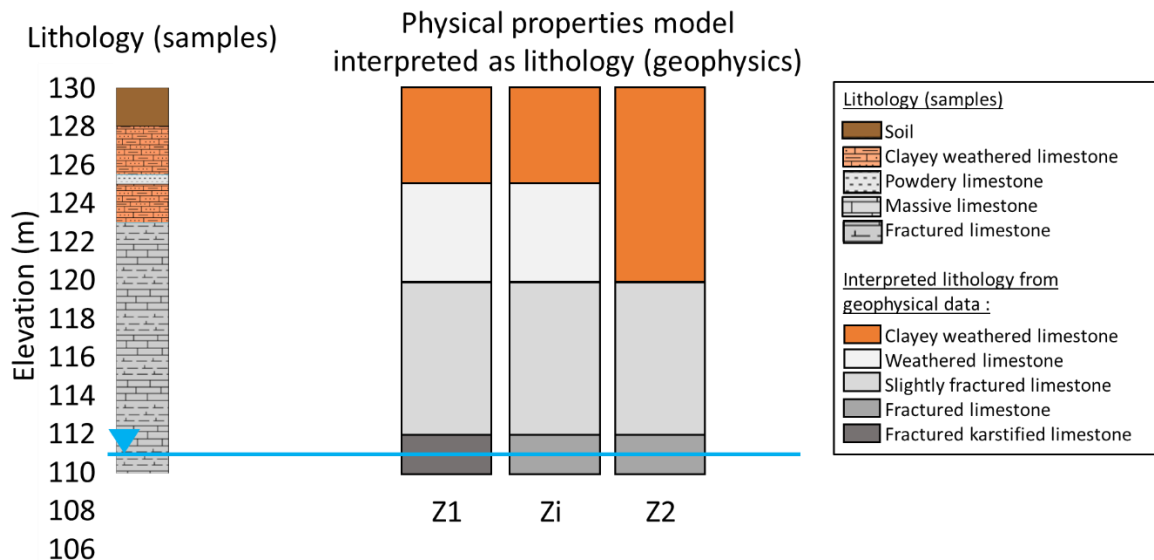


Figure 3.30 : Modèle lithologique basé sur les interprétations géophysiques aux échelles multi-décamétriques et de forage en comparaison, comparé à la connaissance de la géologie du site illustrée par le log lithologique synthétisé par Aldana et al., (2021). La ligne bleue représente le niveau piézométrique (modifié de Ryckebusch et al., 2024).

Ce modèle conduit à distinguer schématiquement 3 zones aux propriétés variées du Sud (Z1) au Nord (Z2) et interprétées à partir de la géophysique en faisant appel à cinq lithologies différentes.

Entre 130 et 125 m : une couche conductrice et chargeable avec une teneur en eau SNMR de 0 % interprétée comme un calcaire fracturé et argileux avec un approfondissement jusque 120 m en Z2.

Entre 120 m et 110 m, l'interprétation de la teneur en eau SNMR et résistivité électrique en 3D montre une couche plus résistante électriquement avec une teneur en eau SNMR plus élevée en Z1 qu'en Z2 dans la zone saturée. Cette couche a d'abord été interprétée comme un calcaire

fracturé avec une fracturation plus élevée en Z1 qu'en Z2. L'interprétation géophysique des données BER et BNMR a permis de préciser cette interprétation avec un calcaire massif peu fracturé de 120 m à 112 m et un calcaire fracturé de 112 m à 110 m avec de la karstification plus importante en Z1.

Les interprétations géophysiques en 3D à l'échelle décamétrique ont permis d'identifier la variabilité lithologique en distinguant différentes zones qui n'étaient pas visibles sur les études précédentes et de préciser les variations du niveau de fracturation des calcaires dans la zone saturée influençant les valeurs de porosité et pouvant influencer les dynamiques d'écoulement.

3.6.2 Modèle de teneur en eau

La Figure 3.31 synthétise les résultats des interprétations géophysiques sur la teneur en eau avec les données SNMR/BNMR et BER. La Figure 3.31 propose un modèle conceptuel de teneur en eau et de porosité basé sur les teneurs en eau BNMR > 40 ms des forages SC05-7-8 en Zi. Dans ce modèle, la valeur du « specific yield » de 9 % (Figure 3.31) est cohérente avec la fourchette de valeurs de la littérature (7 – 13 %) pour les calcaires de Beauce (Schnebelen et al., 1999).

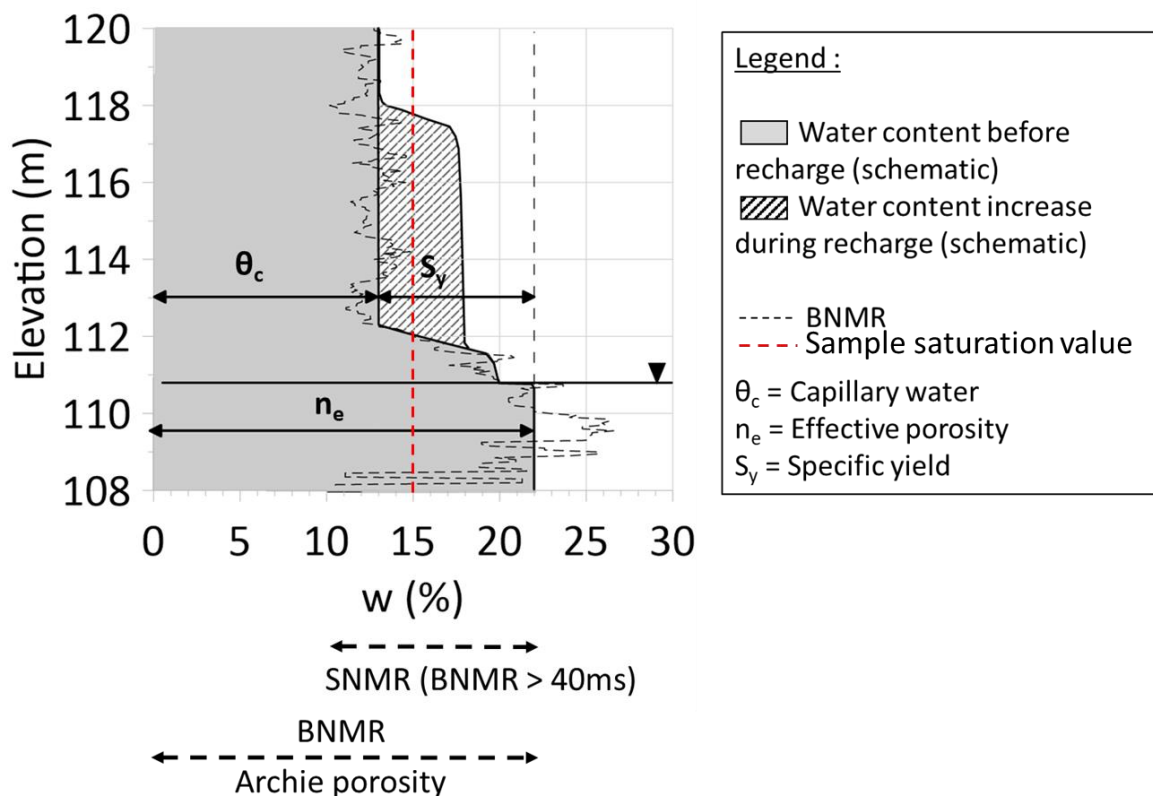


Figure 3.31 : Modèle schématique de teneur en eau des calcaires fracturés de Beauce basé sur les teneurs en eau BNMR > 40 ms des forages SC05-7-8 (Zi). La ligne noire horizontale est le niveau piézométrique. L'eau capillaire, la porosité effective et le « specific yield » de ce modèle simplifié sont en accord et reprennent la nomenclature du modèle conceptuel de porosité de Lubczynski and Roy, (2005) (Figure 2.1). Le trait tiret rouge correspond à la valeur de teneur en eau mesurée à saturation sur les échantillons par (Aldana, 2019). (Modifié de Ryckebusch et al., 2024).

Les écarts plus ou moins importants entre les teneurs en eau du modèle et de celles mesurées (Figure 3.29), sont expliqués par des cavités karstiques de tailles décimétriques observées lors du creusement du puit. La teneur en eau BNMR > 40 ms est proche de la teneur en eau SNMR et du « Specific yield ». La teneur en eau totale BNMR est cohérente avec la porosité d'Archie dans la zone saturée. Le modèle de teneur en eau / porosité est interprété à partir du modèle simplifié construit sur la base du modèle conceptuel de Lubczynski and Roy, (2005) (Figure 2.1). De plus, la teneur en eau associée à la valeur de « capillary water » est cohérente avec la valeur de teneur en eau à saturation des échantillons en laboratoire par (Aldana, 2019), qui mesure essentiellement la porosité de matrice, contenue dans des pores de taille réduite.

3.6.3 Evolution dynamique du modèle de teneur en eau

Legchenko et al., (2022) a appliqué un monitoring de teneur en eau SNMR pendant une année hydrologique sur le site de GB. Ces résultats ont montré une augmentation de la colonne d'eau SNMR de 200 mm pendant le processus d'infiltration pendant la recharge, à comparer avec l'augmentation de la pluie efficace cumulée de 600 mm. Cette augmentation de la colonne d'eau intervient 3 mois avant l'augmentation du niveau piézométrique pendant la recharge. Les données SNMR et BNMR ont été mesurées en septembre 2020 avant la recharge hydrogéologique. Faisons une estimation de l'effet de l'augmentation de la colonne d'eau pendant la recharge.

Dans la (Figure 3.29), la teneur en eau BNMR > 40 ms est en moyenne de 6 % de 111 m à 113 m et de 2 % de 113 m à 120 m dans les calcaires fracturés. En considérant une augmentation de la colonne d'eau de 210 mm, on obtient une augmentation de 3 % de la teneur en eau entre 113 m et 120 m dans la ZNS. Cette augmentation de la colonne d'eau est proche des résultats de (Legchenko et al., 2022) basés sur le monitoring SNMR de 1999-2000. La valeur résultante de teneur en eau dans la ZNS est cohérente avec les données BNMR mesurées. L'augmentation correspondante de la teneur en eau dans la ZNS est illustrée schématiquement dans la Figure 3.31. Ce calcul permet de proposer schématiquement une évolution de la teneur en eau dans la ZNS pendant un événement de recharge important comme celui de 1999-2000, quelques mois avant l'augmentation du niveau piézométrique. Ce modèle peut être utilisé pour faire une première simulation de la réponse géophysique pendant un événement de recharge. Ce constituerait une base pour améliorer les approches de monitoring de la ZNS.

3.6.4 Applicabilité des modèles lithologique et de teneur en eau OZNS au site GB

Les modèles lithologiques et de teneur en eau, définis précédemment à partir des résultats géophysiques, ont été définis pour le site OZNS. Le monitoring SNMR de suivi du stock d'eau dans la ZNS est fait sur le site de Grand Bois (GB). L'objectif ici est de comparer les caractéristiques des sites sur la base des données disponibles, et de discuter si les modèles développés sur OZNS sont applicables au site GB, particulièrement le modèle de teneur en eau qui permettra de faire le lien entre la caractérisation des hétérogénéités du site d'étude et le suivi de dynamique de la ZNS. Notons que nous avons amorcé cette validation en remarquant que la lame d'eau SNMR estimée pendant la recharge 1999-2000 (Legchenko et al., 2020) est compatible avec notre modèle (Section 3.6.3).

Comparaison de la lithologie des deux sites

Lors de l'acquisition des données géophysiques sur le site OZNS en septembre 2020, deux profils ERT dont un avec de l'IP ont été acquis sur le site de GB. De plus, une acquisition TTEM (mesure EM tractée par quad) réalisée en août 2022, couvre tout le secteur séparant les deux sites OZNS et GB ainsi que les sites eux-mêmes. Cette acquisition produit un modèle 3D continu reliant les deux sites. La Figure 3.32 montre la trace de l'acquisition TTEM et la position des deux profils ERT sur le site GB.

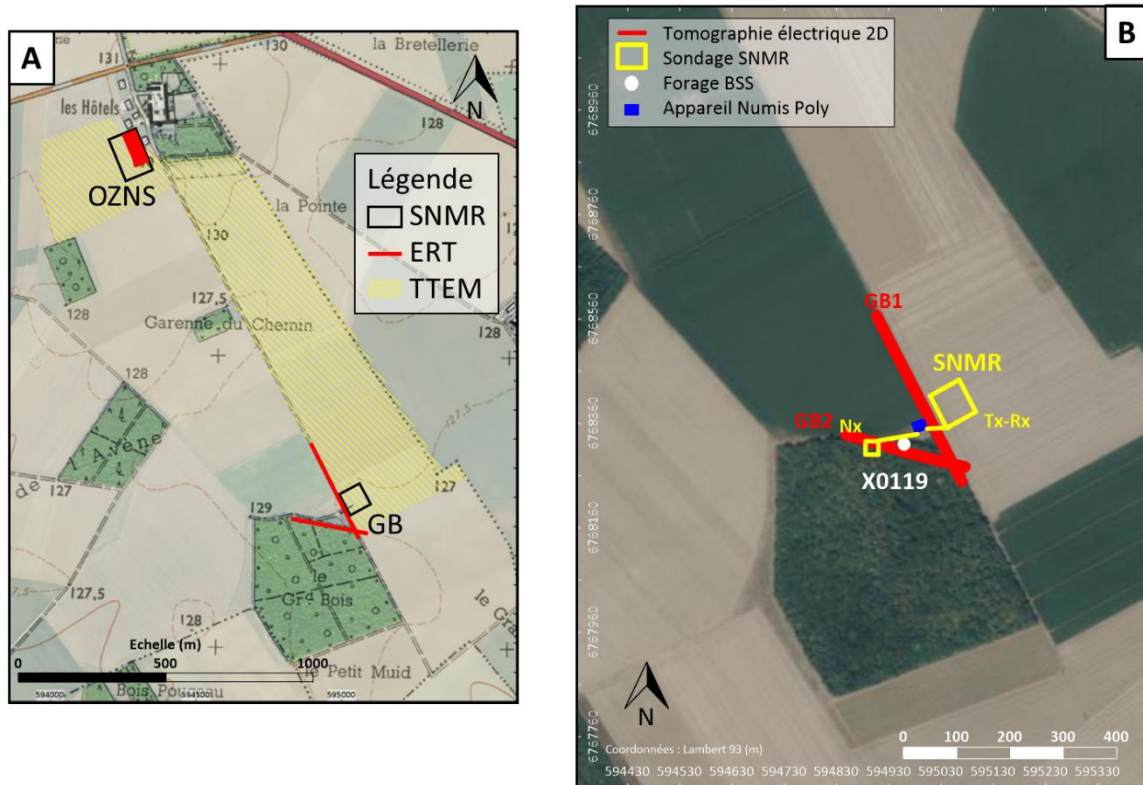


Figure 3.32 : (A) Trace de l'acquisition TTEM mesurée en août 2022 sur les sites OZNS et GB. (B) Position des profils ERT mesurés en septembre 2020 sur le site GB.

Dans la ZNS profonde, il y a globalement une homogénéité de résistivité électrique à environ 150 $\Omega.m$ (dont GB) sauf sur le site OZNS, plus résistant à 200 $\Omega.m$. Deux autres anomalies encore plus résistantes sont également observées localement à l'est de OZNS et au nord de GB. Dans la zone saturée, on observe une alternance de zones résistantes et conductrices avec à GB une résistivité moyenne de 150 $\Omega.m$ et à OZNS une résistivité à 200 $\Omega.m$. A cette profondeur, la zone conductrice (< 150 $\Omega.m$) qui recoupe l'emprise étudiée en écharpe est attribuée à une remontée du toit de la molasse du Gâtinais.

La Figure 3.34 montre les profils ERT GB1 et GB2 avec la position de la boucle SNMR sur le site GB et une tomographie ERT similaire sur le site OZNS.

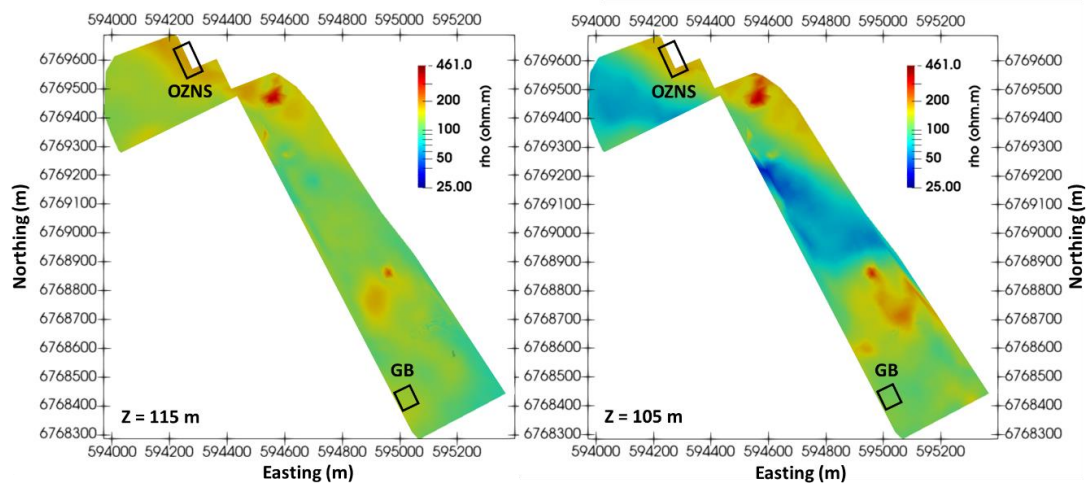


Figure 3.33 : Section horizontale du modèle 3D de résistivité électrique TTEM dans la ZNS (gauche, $Z = 115$ m) et dans la zone saturée (droite, $Z = 105$ m). Les rectangles indiquent la position des sites GB et OZNS.

Les différents profils ERT sont très similaires entre GB et OZNS avec une couche conductrice au-dessus de 120 m, recouvrant une couche résistante jusque 90 m à OZNS et 100 m à GB, elle-même recouvrant une couche conductrice attribuée à la molasse du gâtinais. La différence d'épaisseur de la couche résistante entre les deux sites et la remontée moins profonde du toit de la molasse du gâtinais à GB peut expliquer la différence de résistivité entre les deux sites, la couche résistante de GB ayant une résistivité plus faible que celle d'OZNS. Cela explique également la différence de résistivité sur le modèle 3D mesuré par TTEM à plus grande échelle. Les lithologies sont donc similaires et l'on peut considérer que le modèle lithologique d'OZNS est applicable au site GB.

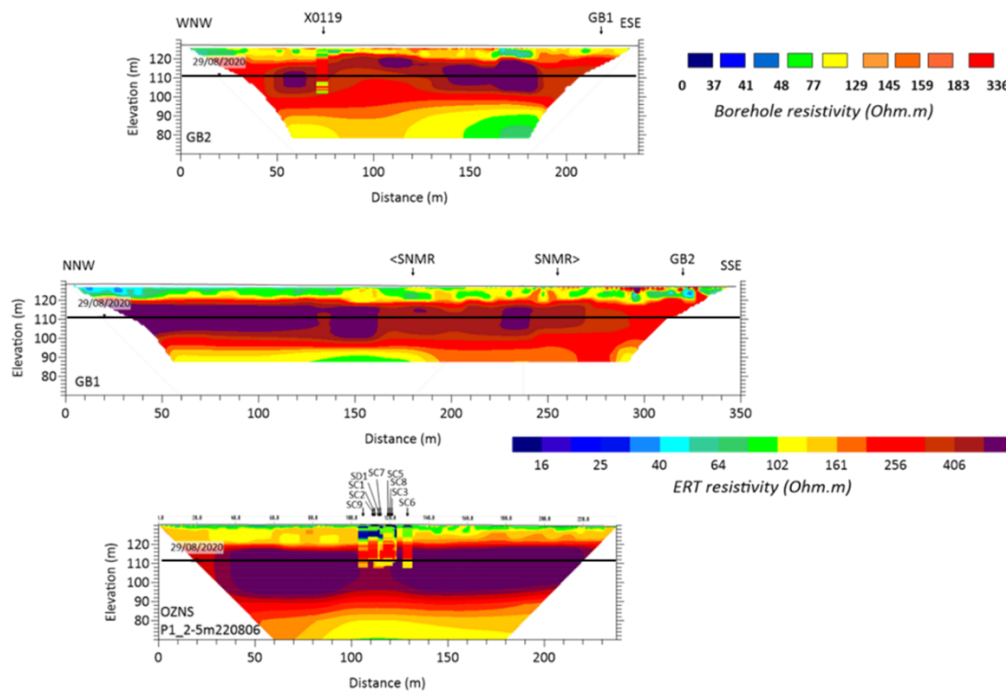


Figure 3.34 : Imagerie ERT dipôle-dipôle GB1et GB2 sur le site de GB, comparés à une tomographie dipôle-dipôle similaire sur le site OZNS . La double flèche indique l'emplacement de la boucle SNMR de monitoring et la ligne noire le niveau piézométrique est indiqué à gauche des sections.

Comparaison des teneurs en eau des deux sites

La Figure 3.35 montre les logs 1D de teneur en eau SNMR extraits du modèle 3D sur le site OZNS et le sondage SNMR mesuré au même moment sur le site GB lors du monitoring 2020-2021. La teneur en eau du sondage GB est globalement cohérente avec les log 1D de teneur en eau extraits du modèle 3D sur le site OZNS. De 130 m à 120 m, la teneur en eau est inférieure à 3 % à GB et à 5 % à OZNS, inférieure à 1 % de 120 m à 116 m pour les deux sites et avec une augmentation à partir de 116 m jusqu'à la zone saturée. Dans la zone saturée, le maximum de teneur en eau à GB est de 11 %. On considère que le sondage 1D a une résolution spatiale plus faible par rapport au modèle 3D d'OZNS et ne tient pas compte des hétérogénéités latérales. La tomographie GB1 (Figure 3.34) ne montre pas d'hétérogénéités significatives sur le site. On considère donc que la teneur en eau SNMR dans la zone saturée est représentative même avec une résolution plus faible. Dans ce cas elle est assimilable aux teneurs en eau des sondages SC05-7-8 dans la zone intermédiaire.

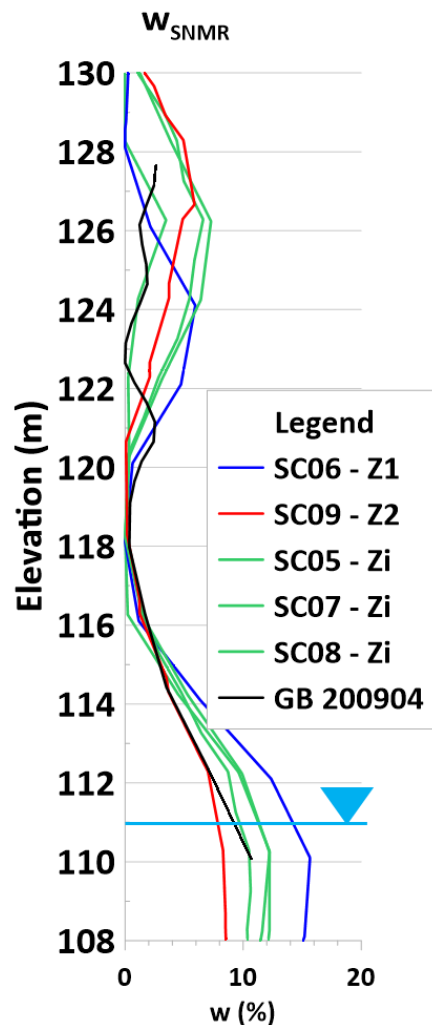


Figure 3.35 : Teneur en eau SNMR 1D extrait du modèle 3D OZNS (sondages SC05-6-7-8-9) et teneur en eau SNMR mesurée à GB le 04/09/20 pendant le monitoring SNMR 2020-2021.

La comparaison des résistivités électrique et des teneurs en eau sur les sites GB et OZNS montre une cohérence entre les deux sites. La lithologie est similaire entre GB et OZNS avec cependant une couche calcaire à GB qui est moins épaisse que celle d'OZNS avec une remontée plus haute du toit de la molasse du gâtinais à GB.

La comparaison des teneurs en eau montre une cohérence entre les deux sites avec une même distribution verticale à GB que dans la zone intermédiaire à OZNS. L'explication peut tenir de la présence d'eau dans des pores de petite tailles avec un T_2 inférieur au dead-time SNMR. Dans ce cas, la différence serait visible sur un sondage BNMR. Le modèle de teneur en eau étant construit pour être compatible avec les teneurs en eau SNMR et BNMR pour $T_2 > 40$ ms, on peut donc considérer que le modèle de teneur en eau construit à OZNS est valable à Grand Bois.

Chapitre 3.7 : Synthèse

L'objectif de cette partie était de caractériser les variabilités lithologiques et hydriques de la ZNS du site OZNS avec une interprétation jointe de données géophysiques mesurées en 3D en surface (SNMR, ERT, IP) et en forage (BNMR, BER, densité) pour améliorer la précision des modèles numériques d'écoulements dans la ZNS.

Dans la zone saturée, le modèle 3D de teneur en eau SNMR a permis d'identifier des variations métriques de teneur en eau, interprétées comme des variations de porosités associés à de la fracturation et karstification dans les calcaires fracturés. Une carte de la distribution spatiale des valeurs T_2^* mesurées en 1D confirme cette interprétation avec des T_2^* plus faibles dans la zone présentant des teneurs en eau plus faibles et interprétée comme un calcaire moins fracturé et des T_2^* plus élevés dans la zone présentant des teneurs en eau élevées et interprétée comme un calcaire karstifié. Les données de forage ont également confirmé cette interprétation avec une variabilité de densité, de résistivité électrique et de distribution de teneur en eau BNMR. Celle-ci présentant une eau majoritairement « bound » dans la zone interprétée comme un calcaire fracturé et une eau majoritairement « moveable » dans la zone interprétée comme un karst. Dans la ZNS, le modèle 3D de résistivité et chargeabilité a permis de d'identifier une variabilité lithologique avec une anomalie plus conductrice et chargeable dans les calcaires, interprétée comme un calcaire plus argileux entre 130 m et 120 m. Entre 120 m et la zone saturée, les données de forage ont permis de préciser l'interprétation en identifiant : un calcaire massif peu fracturé entre 120 m et 112 m et un calcaire fracturé présentant la même variabilité que dans la zone saturée en dessous de 112 m. Ces interprétations ont permis de construire un nouveau modèle lithologique « hydro-géophysique » du site OZNS tenant compte de cette variabilité lithologique. La comparaison de données de résistivité électrique avec des profils ERT mesurés au même moment sur le site GB et l'analyse de données de résistivité électrique TTEM mesurées sur les deux sites montre que les deux sites GB et OZNS ont une lithologie similaire avec cependant la couche calcaire fracturée qui est plus épaisse sur le site OZNS que sur le site GB. Cette différence d'épaisseur de couche étant plus profonde que le modèle lithologique proposé à OZNS (Figure 3.30), ce modèle est donc également valable à GB.

Les variations de teneurs en eau ont ensuite été analysées plus en détail. Dans la zone saturée, les teneurs en eau BNMR ont été comparées aux porosités effectives calculées à partir des données BER et de la loi d'Archie. Cette comparaison a permis d'estimer une valeur de porosité effective. Les teneurs en eau BNMR et SNMR ont ensuite été comparées en tenant compte de l'effet du dead-time sur les valeurs SNMR. Pour cela, les teneurs en eau BNMR ont été coupées des teneurs en eau pour $T_2 < 40$ ms (dead-time SNMR). La comparaison des teneurs en eau étaient alors similaires sauf en présence de karst décimétrique dans la zone saturée provoquant un effet d'échelle avec des teneurs en eau plus élevées en BNMR qu'en SNMR. Ces interprétations ont permis de construire un modèle de teneur en eau mesurable par BNMR et SNMR (Figure 3.31). Pour aller plus loin dans cette comparaison, des nouvelles boucles SNMR décimétriques ont été installées dans le puit OZNS. Les données SNMR mesurées avec ces boucles permettront de comparer les teneurs en eau SNMR et BNMR mesurées à une même échelle décimétrique. Les teneurs en eau SNMR d'OZNS de GB mesurées au même moment étant similaires, ce modèle est supposé applicable à GB.

Une estimation d'une augmentation de la hauteur d'eau SNMR avec la recharge sur la base du monitoring SNMR 1999-2000 montre des teneurs en eau cohérentes avec les données. Ce modèle pourra servir de base pour simuler les variations de teneurs en eau SNMR associées à la recharge de la ZNS. De plus, le modèle lithologique peut servir de base pour proposer un monitoring de teneur en eau dans les différentes zones sur le site OZNS et ainsi confirmer la variabilité des temps d'infiltration hydriques dans la ZNS associées aux hétérogénéités lithologiques.

Partie 4 : Suivi temporel du stock d'eau dans la ZNS sur le site GB

Chapitre 4.1 : Introduction et contexte hydrométéorologique

4.1.1 Introduction

Cette partie traite de l'étude dynamique du comportement de la ZNS avec un suivi temporel des stocks d'eau dans la ZNS sur le site GB. Comme mentionné dans la section 1.2.2, un suivi SNMR a été fait durant deux années hydrologiques par (Legchenko et al., 2022, 2020) sur le site de GB en 1999-2000 et en 2020-2021. Les objectifs de cette partie sont les suivants :

1. Tester et confirmer la robustesse du suivi SNMR dans la ZNS révélée par (Legchenko et al., 2022, 2020) dans de nouvelles conditions hydrométéorologiques
2. Analyser la réponse SNMR dans de nouvelles conditions hydrométéorologiques et mettre en évidence la cohérence ou la variabilité des réponses
3. Tester l'apport du suivi SNMR pour améliorer le suivi des stocks d'eau dans la ZNS avec une modélisation hydrologique
4. Proposer un modèle optimisé du comportement hydrique de la ZNS sur la base des résultats SNMR.

Les objectifs 1 et 2 sont traités dans cette partie et les objectifs 3 et 4 sont en perspectives. Pour cela, un monitoring SNMR de deux ans a été mis en place entre 2022 et 2024 sur le site GB. Ce site a été préféré au site OZNS afin de permettre une comparaison avec les données existantes sur la base de mesures faites au même endroit, avec les mêmes paramètres de mesure, ne faisant varier que les conditions hydrologiques. Cependant, comme discuté dans le chapitre 3.6, les modèles lithologiques et de teneur en eau définis à OZNS sont applicables à GB et permettront de faire le lien entre les deux sites pour avoir une caractérisation complète de la ZNS.

Sur la base des résultats précédents, plusieurs paramètres seront comparés : le ratio entre la lame d'eau infiltrée et l'augmentation de la hauteur d'eau SNMR et le délai entre cette augmentation et l'augmentation du niveau piézométrique. La section 4.1.2 explique comment les chroniques de pluie efficace, c'est-à-dire la lame d'eau infiltrée, sont calculées. La section 4.1.3 présente le paramètre d'hauteur d'eau SNMR, comparé à la lame d'eau infiltrée. Le Chapitre 4.2 présente le monitoring 2022-2024 et ses résultats, discutés avec ceux des autres monitorings.

4.1.2 Lamé d'eau infiltrée : calcul de la pluie efficace

Pour suivre l'évolution temporelle du stock d'eau dans la ZNS, il est nécessaire de définir ce stock c'est-à-dire le volume ou la lame d'eau qui s'infiltré dans la ZNS correspondant à la pluie efficace. Celle-ci dépend de plusieurs paramètres comme la pluie, l'évapotranspiration ou la réserve utile du sol c'est-à-dire la « réserve disponible pour l'évapotranspiration » ou la « capacité de rétention » hors eau liée. Dans ce travail, la pluie efficace est calculée avec un modèle global à réservoir de type pluie/niveau, la Figure 4.1 montre le réservoir sol de ce modèle et les principales variables utilisées pour le calcul de la pluie efficace. Le logiciel GARDENIA, développé au BRGM a été utilisé pour ce calcul (Thiery, 2014).

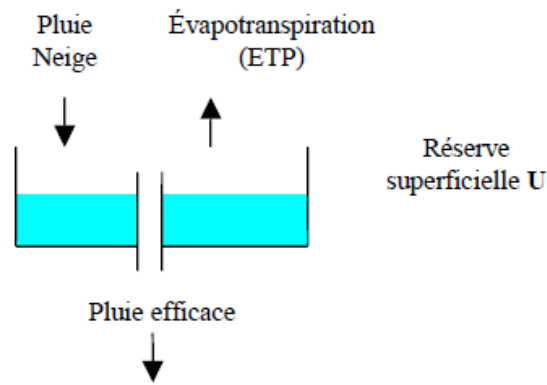


Figure 4.1 : Schéma du modèle réservoir utilisé dans GARDENIA pour le calcul de la pluie efficace (Thiery, 2014).

Le calcul est fait à partir des chroniques de pluie et ETP. La chronique de pluie est celle mesurée à la station météo de Bricy. Les données ETP sont les chroniques spatialisées avec le module SAFRAN sur un maillage de 8 km à partir des chroniques ETP mesurées à la station météo de Bricy. La Figure 4.2 localise la maille SAFRAN de Villamblain, les sites OZNS et GB et la station météo de Bricy.

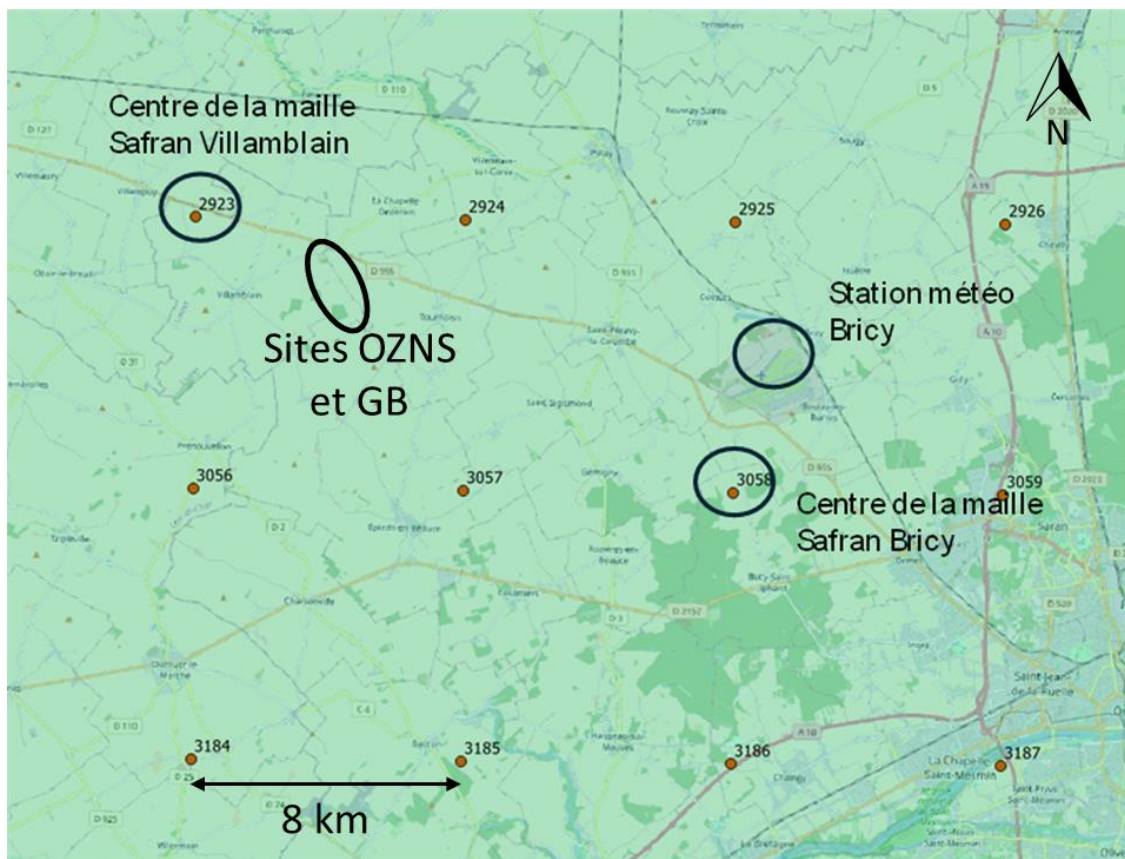


Figure 4.2 : Localisation du centre des mailles SAFRAN (maille de 8km de côté) avec leurs numéros. Le centre de la maille Villamblain (2923) est proche des sites OZNS et GB.

Le calcul de la pluie efficace est fait avec un pas de temps journalier entre 1965 et 2024. Le modèle simule les variations du niveau piézométrique au piézomètre de Poiseaux. La Figure 4.3 montre les variations du niveau piézométrique simulées et mesurées. La simulation est évaluée avec le coefficient de Nash qui évalue la capacité prédictive des modèles hydrologiques. Un modèle est correct avec une valeur supérieure à 0.8. Les variations simulées reproduisent correctement les variations observées du niveau piézométrique avec un coefficient de Nash de 0.916.

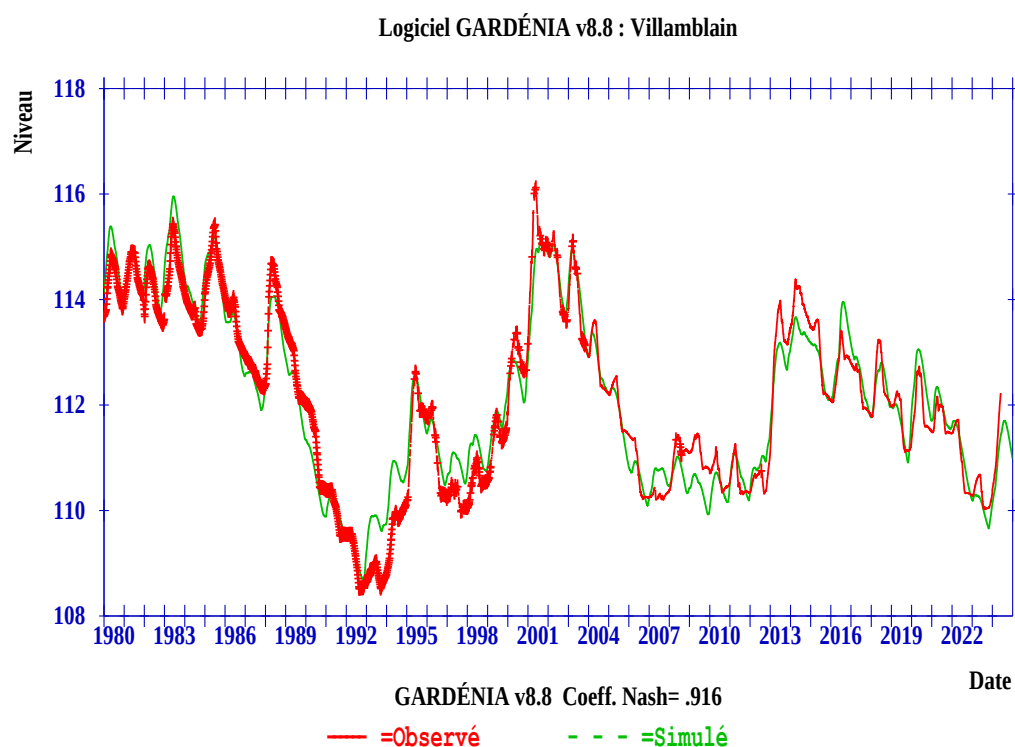


Figure 4.3 : Variations du niveau piézométrique observée à Villamblain (rouge) et simulée (vert) dans GARDENIA avec un modèle réservoir calculant la pluie efficace.

La Figure 4.4 présente les variations annuelles de la pluie efficace calculée. La pluie efficace annuelle a une moyenne de 187 mm avec un minimum de 37 mm en 1992 et un maximum de 443 mm en 2000. On observe que les variations suivent un cycle pluriannuel avec une période de 17 ans.

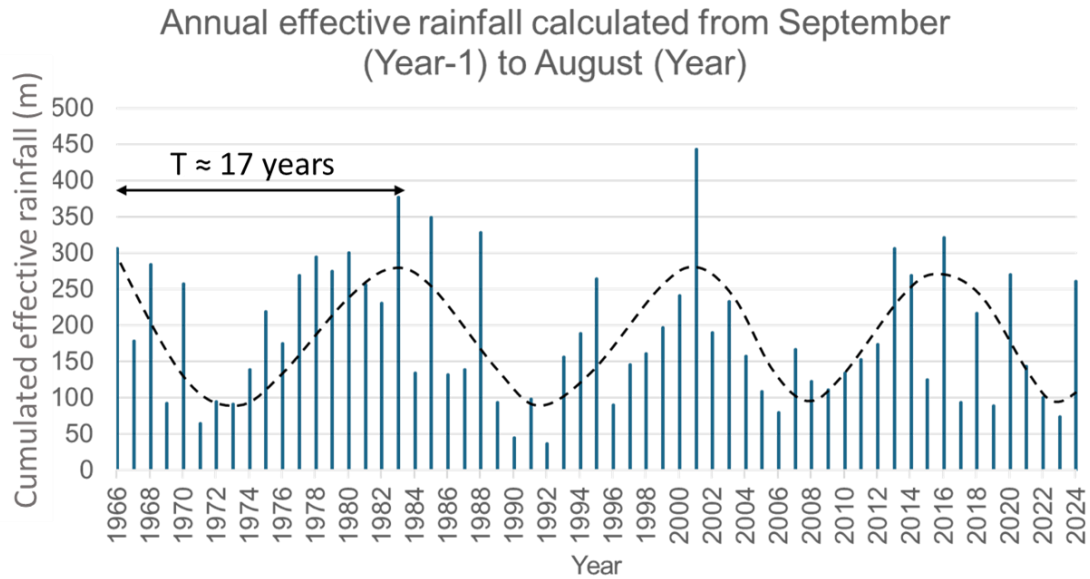


Figure 4.4 : Variation annuelle de pluie efficace calculée avec le logiciel GARDENIA. Le trait tiret montre un cycle pluriannuel d'environ 15 ans de ces variations.

4.1.3 Calcul de la hauteur d'eau SNMR

Jusqu'à présent le paramètre SNMR qui a été interprété dans les modèles inversés est de la teneur en eau en fonction de la profondeur. Un second paramètre est calculé à partir de ces modèles : la hauteur d'eau SNMR. Un modèle de teneur en eau consiste en une succession de teneur en eau volumique w (%) sur un modèle maillé avec des mailles d'épaisseur Δz (m). De ce fait, il est possible de calculer la hauteur d'eau SNMR H_w (m) avec l'équation 4.1 :

$$h_{RMP} = w\Delta z \text{ (m)} \quad (4.1)$$

De plus, les estimateurs w et Δz sont peu stables séparément car sujets à des solutions équivalentes, que leur produit $w\Delta z$ correspondant à la hauteur d'eau (Legtchenko, 2013). **Afin de permettre la comparaison avec la lame d'eau infiltrée, la hauteur d'eau SNMR est calculée sur l'épaisseur de la ZNS soit entre 128.5 m et 108.5 m.**

Chapitre 4.2 :Monitoring de teneur en eau SNMR 2022-2024

4.2.1 Acquisition et filtrage des données

Acquisition SNMR time-lapse

L'acquisition des sondages SNMR a été réalisée sur le site GB du 05/10/2022 au 24/06/2024, à fréquence mensuelle avec la mesure d'un sondage SNMR et la mesure du niveau piézométrique au piézomètre BSS 03622X0119/FP3-25 (X0119 sur la Figure 4.5.C).

Toutes les mesures SNMR ont été réalisées avec l'appareil NUMIS POLY et la configuration suivante :

- Une boucle Tx-Rx émission réception carrée 1 tour de 75m de côté enterrée à 50 cm de profondeur avec une arrivée des câbles dans un regard (Figure 4.5.A)
- Une boucle Nx de bruit carrée 1 tour de 10 m de côté placée à 100 m de la boucle Tx-Rx (Figure 4.5.B) et enregistrée numériquement sur une deuxième voie NUMIS POLY.

Les acquisitions des mesures ont été réalisées sur 2 jours de travail selon le protocole suivant :

- *Jour 1 après-midi* : installation du matériel et branchement à la boucle, lancement de la mesure
- *Jour 2 matin* : réception de la mesure, vérification du niveau de bruit et qualité du sondage

Le 05/12/22, les niveaux de bruits trop importants n'ont pas permis de faire une mesure complète et le sondage ne comporte que les 8 premiers pulses. Suite à cette mesure, une autre étape a été ajoutée au protocole.

- *Jour 2 matin et après-midi* : relance de la mesure si celle-ci est incomplète et/ou le niveau de bruit était trop élevé

Le Tableau 4.1 liste les caractéristiques principales des sondages réalisés.

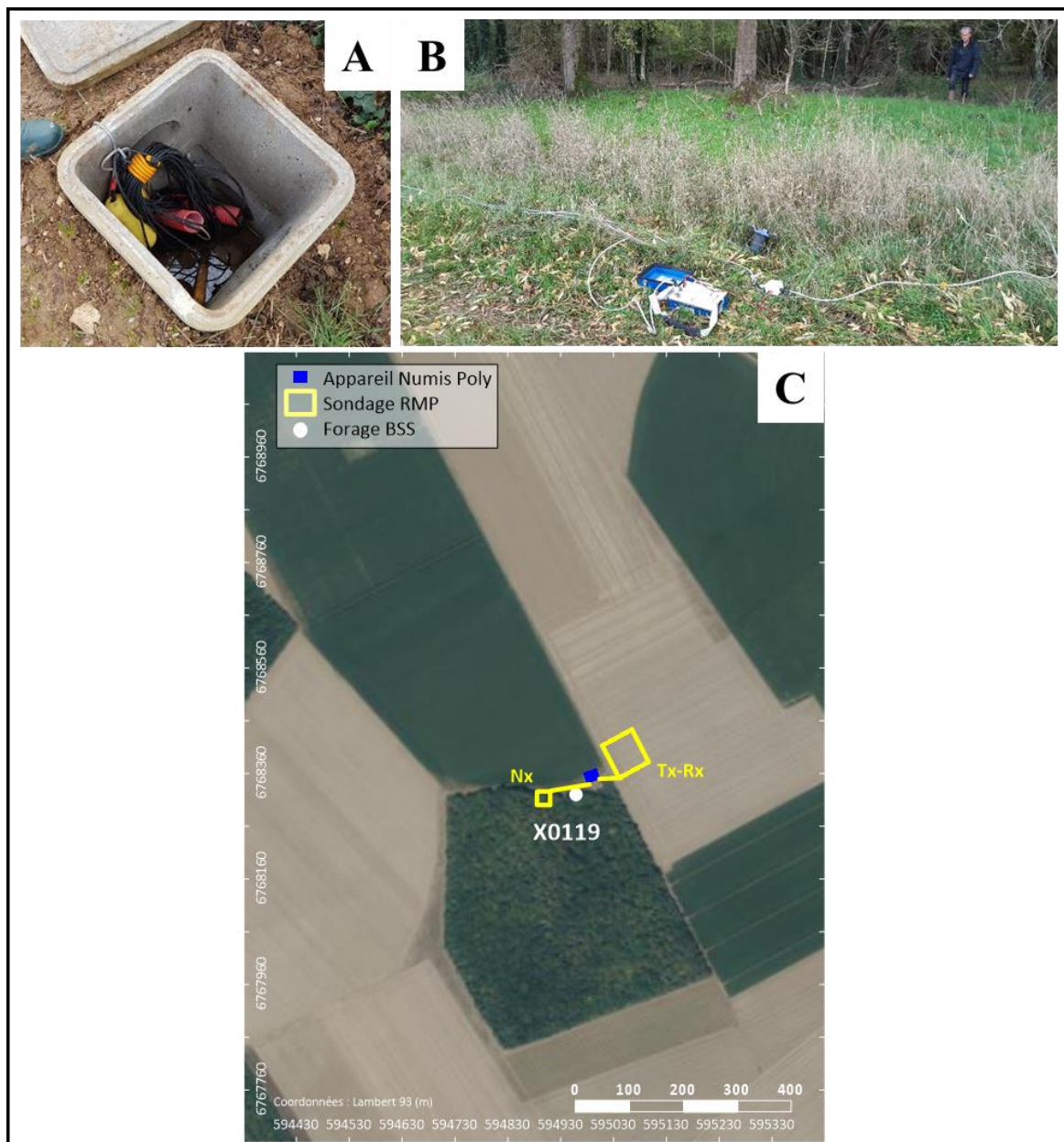


Figure 4.5 : Dispositif de mesure avec (A) le regard de sortie des câbles de la boucle Tx-Rx carrée 75 m 1 tour + une rallonge pour brancher la boucle à l'appareil, (B) la boucle de bruit Nx carrée 10 m, (C) une carte du site Grand Bois avec la boucle Tx-Rx, la boucle de bruit Nx et le piézomètre BSS 03622X0119/FP3-25 (X0119 sur la Figure 4.5.C).

site	sounding	date	coil	pulses nb	pulses	nstack
GB1	SQ75_221005	05/10/2022	TxRx SQ75 Nx SQ10	16	1-16	250
GB1	SQ75_221107	07/11/2022	TxRx SQ75 Nx SQ10	16	1-16	250
GB1	SQ75_221205	05/12/2022	TxRx SQ75 Nx SQ10	8	2-8	250
GB1	SQ75_230109	09/01/2023	TxRx SQ75 Nx SQ10	16	1-16	250
GB1	SQ75_230207	07/02/2023	TxRx SQ75 Nx SQ10	16	1-16	250
GB1	SQ75_230307	07/03/2023	TxRx SQ75 Nx SQ10	16	1-16	250
GB1	SQ75_230405	05/04/2023	TxRx SQ75 Nx SQ10	16	1-16	250
GB1	SQ75_230503	03/05/2023	TxRx SQ75 Nx SQ10	16	1-16	250
GB1	SQ75_230601	01/06/2023	TxRx SQ75 Nx SQ10	16	1-16	250
GB1	SQ75_230703	03/07/2023	TxRx SQ75 Nx SQ10	14	1-14	200
GB1	SQ75_230802	02/08/2023	TxRx SQ75 Nx SQ10	16	1-16	250
GB1	SQ75_230927	27/09/2023	TxRx SQ75 Nx SQ10	16	1-16	250
GB1	SQ75_230928	28/09/2023	TxRx SQ75 Nx SQ10	16	1-16	250
GB1	SQ75_231024	24/10/2023	TxRx SQ75 Nx SQ10	16	1-16	250
GB1	SQ75_231130B	30/11/2023	TxRx SQ75 Nx SQ10	16	1-16	250
GB1	SQ75_240115	15/01/2024	TxRx SQ75 3Nx SQ10	16	1-16	250
GB1	SQ75_240223	23/02/2024	TxRx SQ75 Nx SQ10	16	1-16	250
GB1	SQ75_240325	25/03/2024	TxRx SQ75 3Nx SQ10	16	1-16	250
GB1	SQ75_240419	19/04/2024	TxRx SQ75 3Nx SQ10	16	1-16	250
GB1	SQ75_240515	15/05/2024	TxRx SQ75 3Nx SQ10	16	1-16	250
GB1	SQ75_240603	03/06/2024	TxRx SQ75 3Nx SQ10	16	1-16	250
GB1	SQ75_240624	24/06/2024	TxRx SQ75 3Nx SQ10	16	1-16	250

Tableau 4.1 : Récapitulatif des sondages réalisés lors du monitoring sur le site de Grand Bois et leurs principales caractéristiques.

Filtrage des données SNMR

Pour le filtrage des données SNMR du monitoring 2022-2024, l'analyse et le choix s'appuient sur les données du monitoring fait sur le même site en 2020-2021. Dans un premier temps, les conditions de mesures sont analysées avec (1) le contexte de bruit et (2) la position de la fréquence de Larmor par rapport à la fréquence du 50 Hz, pour les deux monitorings.

Conditions de bruit lors des mesures

La Figure 4.8 montre les variations du bruit mesuré lors du monitoring 2022-2024.

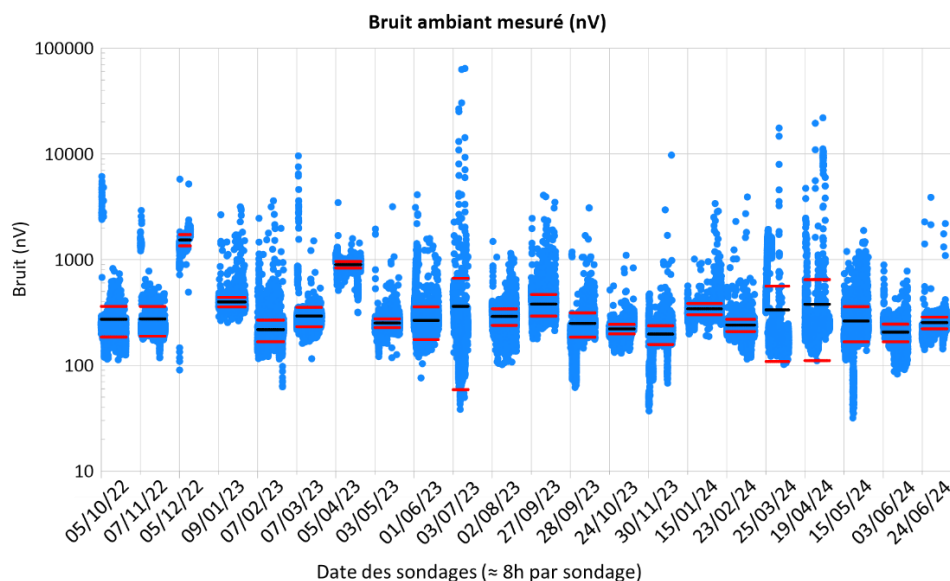


Figure 4.6 : Niveaux de bruit ambiant mesurés pendant le monitoring pour chaque sondage avec la valeur moyenne (barre noire) et les écarts types (barres rouges).

Les sondages ont des niveaux de bruits moyens compris entre 200 et 400 nV, sauf pour les sondages du 05/12/22 et 05/04/23 avec respectivement des bruits moyens de 1533 nV et 896 nV. Les écarts-types sont compris entre 20 et 100 nV sauf pour les sondages du 05/12/22, 03/07/23, 25/03/24 et 19/04/24 avec des écarts-types respectifs de 187 nV, 302 nV, 225 nV et 267 nV. Tous présentent des pics élevés de bruit. D'après l'expérience du monitoring 2020-2021, un sondage avec un bruit ambiant supérieur à 600 nV est considéré comme difficile à traiter pour obtenir une bonne qualité du sondage. En se basant sur ce premier critère, les sondages sont considérés comme de bonne qualité avec un bruit ambiant moyen inférieur à 600 nV sauf les sondages du 05/12/22 et du 05/04/23. La Figure 4.7 montre une comparaison des niveaux de bruits mesurés lors des monitorings 2020-2021 et 2022-2024 faits sur le même site à la même période. Les gammes de niveau de bruit mesuré sont équivalentes sur l'ensemble du monitoring 2022-2024 et par rapport au monitoring 2020-2021 sauf pour le sondage de septembre avec un niveau de bruit plus faible en 2020-2021.

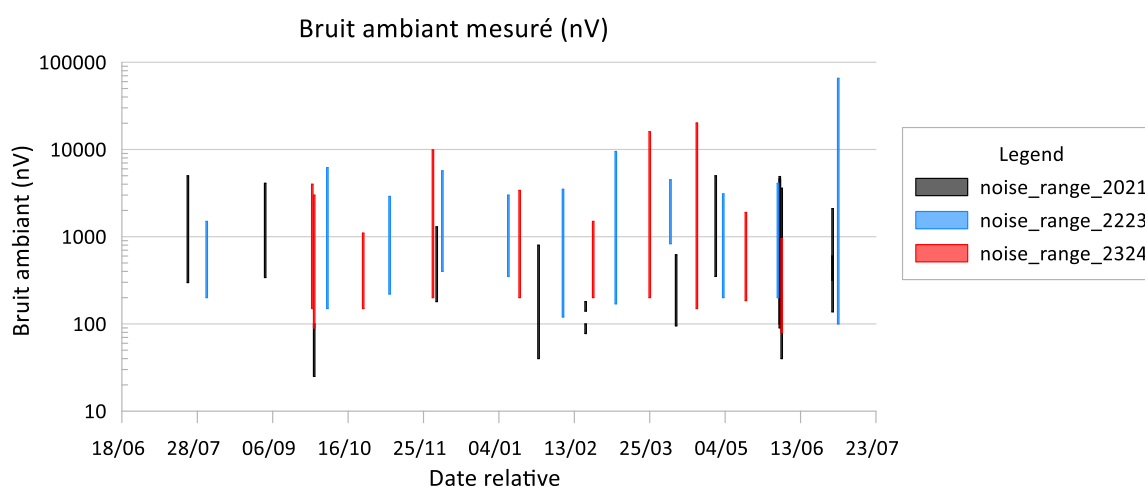


Figure 4.7 : Comparaison des niveaux de bruits ambiants mesurés pendant les monitorings 2020-2021 et 2022-2024.

La fréquence du 50 Hz et ses harmoniques sont les fréquences de transport du courant électrique sur le réseau européen. Cela génère un bruit électromagnétique qui impacte les signaux SNMR. Dans nos enregistrements entre 2021 et 2024 nous nous rapprochons de l'harmonique 2050 Hz. La Figure 4.8 montre la fréquence de Larmor mesurée lors des monitoring 2022-2024 et 2020-2021. Pour le monitoring 2022-2024, la fréquence de Larmor atteint les 2045 Hz soit un écart de 5 Hz ou moins avec l'harmonique.

Le filtrage notch est classiquement utilisé et très efficace pour filtrer ces bruits. Mais quand la fréquence de Larmor se rapproche de l'harmonique, il convient de l'utiliser avec précaution. (Legchenko and Valla, 2003) montrent que le filtre notch peut affecter le signal SNMR quand l'écart entre l'harmonique et la fréquence de Larmor mesurée est inférieure à 8 Hz. L'usage du logiciel NUMPro et les développements récents qu'il applique permettent d'utiliser la version « Narrow » du filtre notch quand l'écart est inférieur à 10 Hz et jusqu'à près de 5 Hz d'écart. L'expérience de 2021 montre que l'option Global Narrow du notch est une combinaison efficace qui n'affecte pas le signal.

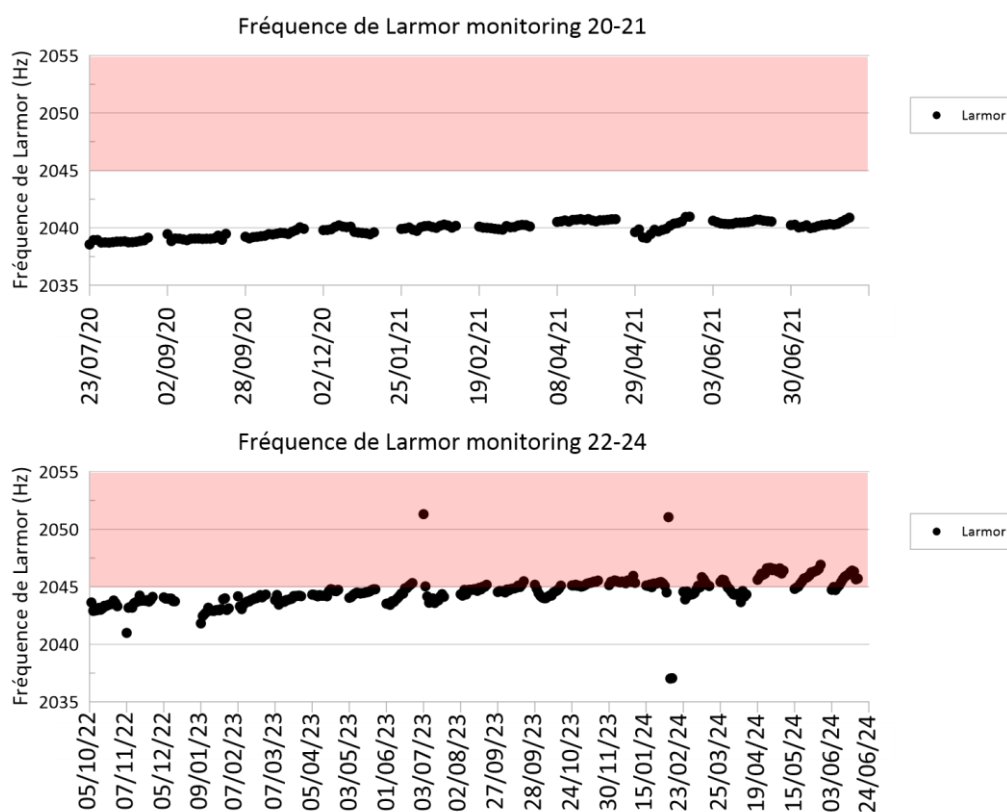


Figure 4.8 : (Haut) Fréquence de Larmor mesurée par pulse pour chaque sondage lors du monitoring 2020-2021. (Bas) Fréquence de Larmor appliquée par pulse pour chaque sondage lors du monitoring 2022-2024. La bande rouge présente une bande de ± 10 Hz autour de la fréquence 2050 Hz, harmonique du 50 Hz.

Filtrage du monitoring 2020-2021

Lors du monitoring 2020-2021, dont les données et les résultats sont présentés dans le rapport BRGM RP-72842-FR, plusieurs stratégies de traitements ont été appliquées et résumées dans le Tableau 4.2.

Nom	Stack optimisé (RDEO) + spike rejection 6000 nV	Noise level rejection (600-1000 nV selon sondage)	Notch Global Narrow
1	✓	✗	✗
2	✓	✗	✓
3	✗	✓	✗
4	✗	✓	✓

Tableau 4.2 : Stratégies de traitements testées lors du monitoring 2020-2021.

Suite à différents tests avec chaque stratégie de filtrage, il apparaît que les filtrages « optimisation du stack + spike level rejection + notch global narrow » et « noise level rejection + notch global narrow » ont des résultats équivalents et le filtrage sur seuil de bruit à priori n'affecte pas le signal. La stratégie de filtrage retenue pour le monitoring 2020-2021 était donc :

- Filtrage « optimisation du stack + spike level rejection + notch global narrow » pour estimer le seuil de rejection du bruit
- Filtrage définitif « noise level rejection + notch global narrow »

Et finalement, les deux stratégies de filtrage ont été retenus selon les cas, obtenant un ensemble de sondages avec un S/N compris entre 10 et 25.

Filtrage du monitoring 2022-2024

Pour le monitoring 2022-2024, plusieurs filtrages sont comparés :

- Pas de filtrage
- RDEO + spike
- RDEO + spike + notch local 50 (NL) Hz
- Seuil de bruit à 1000 nV + notch local 50 (NL) Hz

La Figure 4.9 compare les différents filtrages sur les paramètres d'amplitude maximale (E_{0max}) et qualité : signal sur bruit (S/N) et bruit (EN/IN). La Figure 4.10 compare les différents filtrages sur les paramètres de Colonne d'eau SNMR et des constantes de temps de relaxation T_2^* et T_1 .

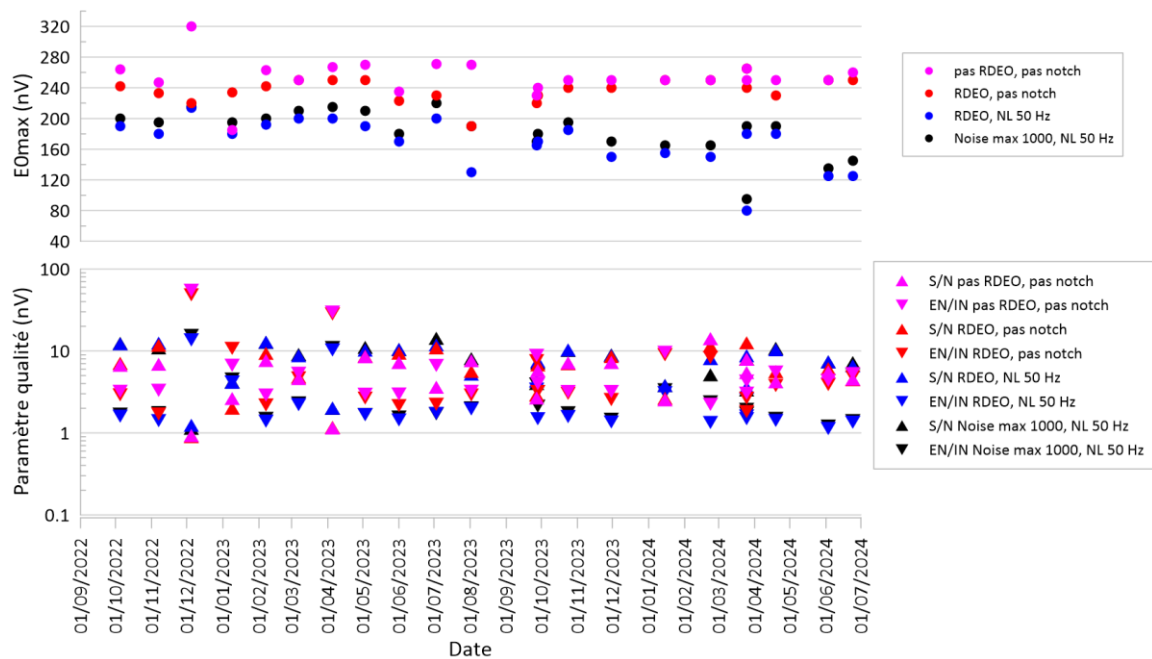
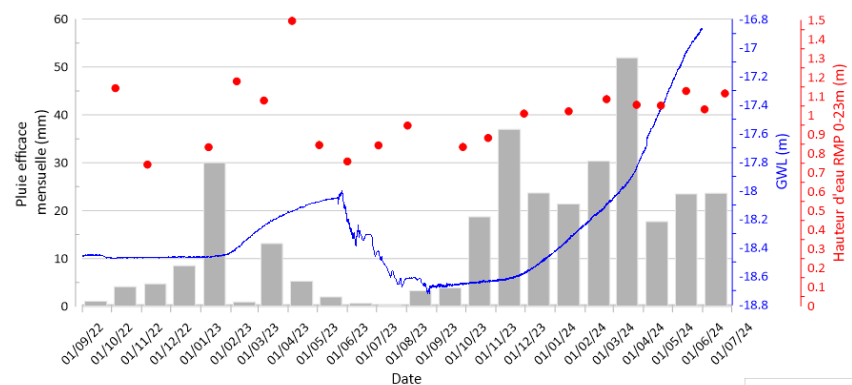


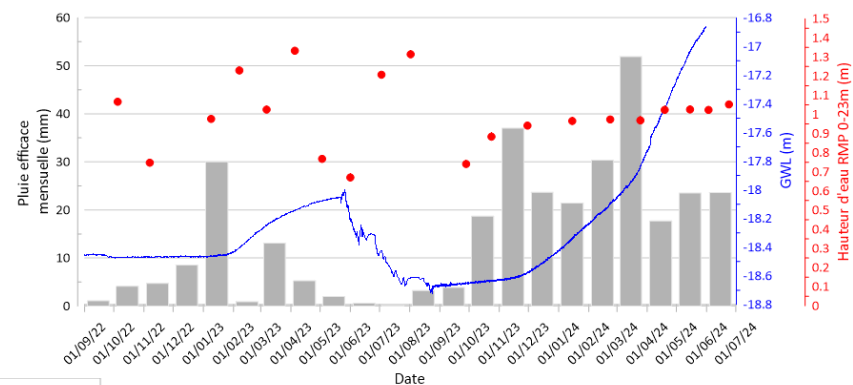
Figure 4.9 : Comparaison de différents filtrages sur les paramètres : (Haut) d'amplitude E_0 maximale, (Bas) de qualité : signal sur bruit (= S/N) et bruit (= EN/IN).

D'après l'analyse de la fréquence de Larmor précédemment, on s'attend à ce que les filtrages avec notch coupent une partie du signal. Avec les filtrages « RDEO + notch » et « Bruit à 1000 nV + notch », on observe : une baisse globale de l'amplitude $E_{0\max}$ et de la hauteur d'eau SNMR en cohérence avec le passage progressif de la fréquence de Larmor à moins de 5 Hz d'écart avec l'harmonique. Sur les paramètres S/N et EN/IN, cela se traduit par une baisse significative du bruit (EN/IN) sans augmentation significative du signal sur bruit (S/N) confirmant la perte de signal avec le filtrage. Les filtrages par notch sont donc écartés.

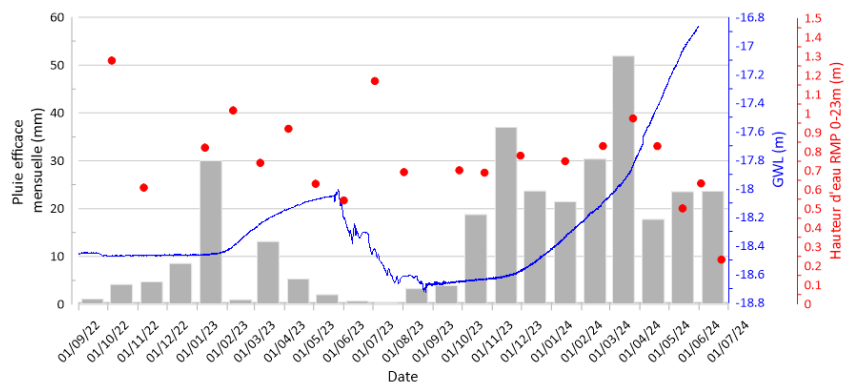
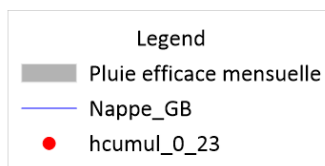
Pour le choix d'un filtrage avec ou sans optimisation du stack (RDEO), l'utilisation du RDEO fait baisser légèrement les amplitudes maximales. Pour les paramètres qualités, globalement le RDEO baisse le niveau de bruit EN/IN et augmente légèrement le S/N. Pour la hauteur d'eau SNMR, on observe une augmentation des hauteurs d'eau lors de la recharge 2022-2023 avec des valeurs plus dispersées pour le filtrage RDEO. Pour la recharge 2023-2024, on observe une augmentation dans les deux cas. Le stack optimisé ne montrant pas d'amélioration significative des données, le choix est fait de retenir les données **sans filtrage et sans optimisation du stack** (légende rose sur la Figure 4.9 et encadré « pas filtre » sur la Figure 4.10). Après filtrage, les sondages ont un S/N moyen de 6.06 nV, compris entre 1.15 nV et 14.6 nV et un EN/IN moyen de 5.59 nV, compris entre 2.23 nV et 29.78 nV.



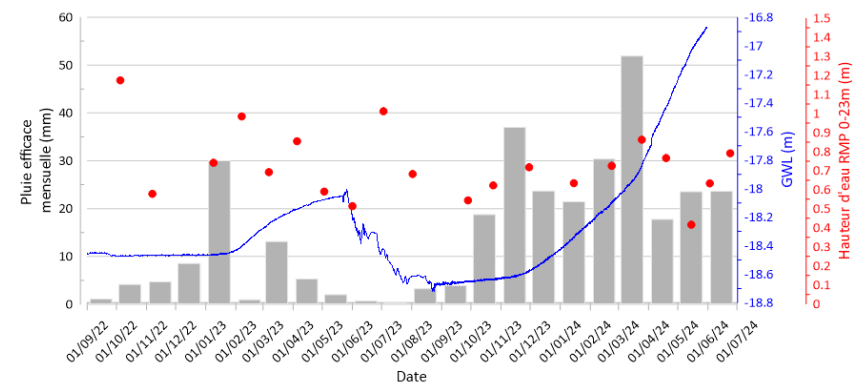
Sans filtre



RDEO + spike



Bruit 1000 nV + NL



RDEO + spike + NL

Figure 4.10 : Comparaison des différents filtrages sur les paramètres de : hauteur d'eau SNMR sur la colonne 0 – 23 m, constante de temps de relaxation T_2^* et T_1 sur les pulses au S/N le plus élevés à 2100 A.ms (voir le filtrage des données SNMR OZNS). En complément, sont présentés la pluie efficace mensuelle et le niveau piézométrique (courbe bleue).

4.2.2 Inversion et résultats

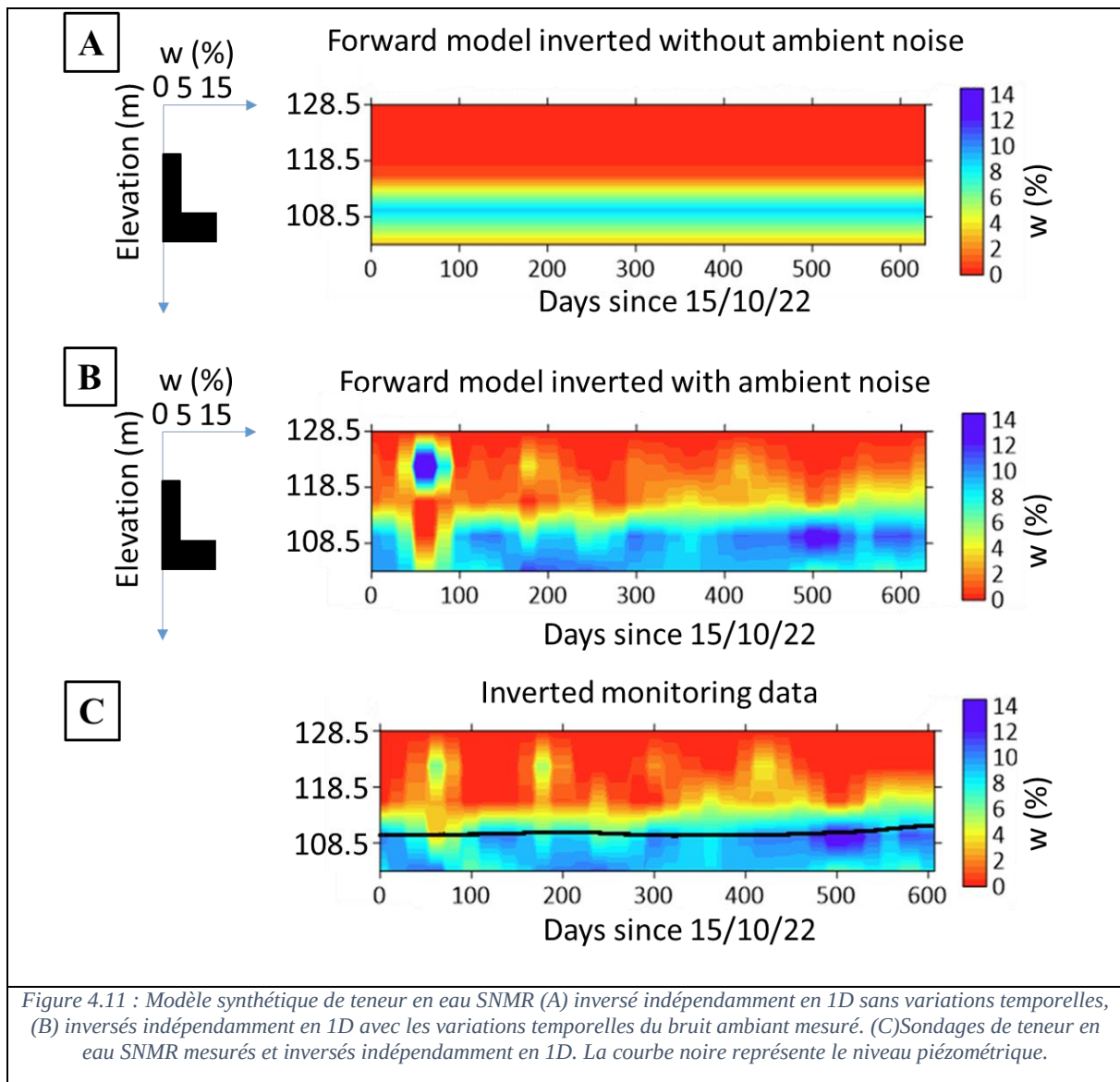
Inversion des données SNMR et interprétation préliminaire

Inversion indépendante des sondages en 1D

Plusieurs stratégies d'inversions sont testées à partir d'essais sur modèles synthétiques. Les sondages sont d'abord inversés en 1D indépendamment du temps. Les résultats sont comparés à un modèle synthétique à deux couches : (1) entre 118.5 m et 108.5 m avec une teneur en eau de 5% (ZNS), (2) entre 108.5 m et 103.5 m avec une teneur en eau de 15% (zone saturée). Le modèle est constant dans le temps et inversé dans les mêmes conditions que les sondages mesurés. La Figure 4.11.A montre le modèle synthétique inversé indépendamment en 1D. La Figure 4.11.B montre le modèle synthétique inversé indépendamment en 1D avec les variations temporelles du bruit ambiant mesuré. La Figure 4.11.C montre les sondages mesurés et inversés indépendamment en 1D dans les mêmes conditions. L'inversion 1D est faite avec les paramètres automatiques du logiciel SAMOVAR 1D (A. LEGCHENKO, communication personnelle) c'est-à-dire avec une régularisation des paramètres w , T_2^* et T_1 lors de l'inversion de chaque sondage.

Le résultat d'inversion du modèle synthétique seul (Figure 4.11.A) montre une teneur en eau à 0 % jusque 113.5 m, puis une augmentation progressive de la teneur en eau entre 113.5 m et 108.5 m jusque 15 %, puis une baisse de la teneur en eau jusque 103.5 m à 0 %. L'inversion du modèle synthétique reproduit correctement la couche 2 avec une teneur en eau maximale de 15%. Les limites de la couche sont lissées lors de l'inversion entre 113.5 m et 103.5 m. La limite haute est confondue avec la couche 1 à 5%. Celle-ci n'est alors pas distinguable clairement.

La comparaison des Figure 4.11.A et Figure 4.11.B montre que le bruit mesuré influence fortement les résultats d'inversion sur le modèle synthétique. Le modèle inversé avec du bruit présente une augmentation progressive de la teneur en eau entre les jours 400 et 600 et entre 118.5 m et 108.5 m. En comparant avec la Figure 4.11.C, on constate que le modèle synthétique inversé avec du bruit et les données mesurées et inversées dans les mêmes conditions, présentent les mêmes variations de teneurs en eau malgré des hauteurs d'eau qui varient temporellement. A priori, cela signifie soit que les variations mesurées ne sont pas significatives et uniquement expliquées par le bruit, soit que le bruit impacte fortement les variations lorsque les sondages sont inversés indépendamment. Avec une inversion time-lapse, nous espérons que la régularisation sur l'ensemble du jeu de données permette de mieux accommoder le bruit et de révéler des variations de hauteur d'eau et de teneur en eau significatives.



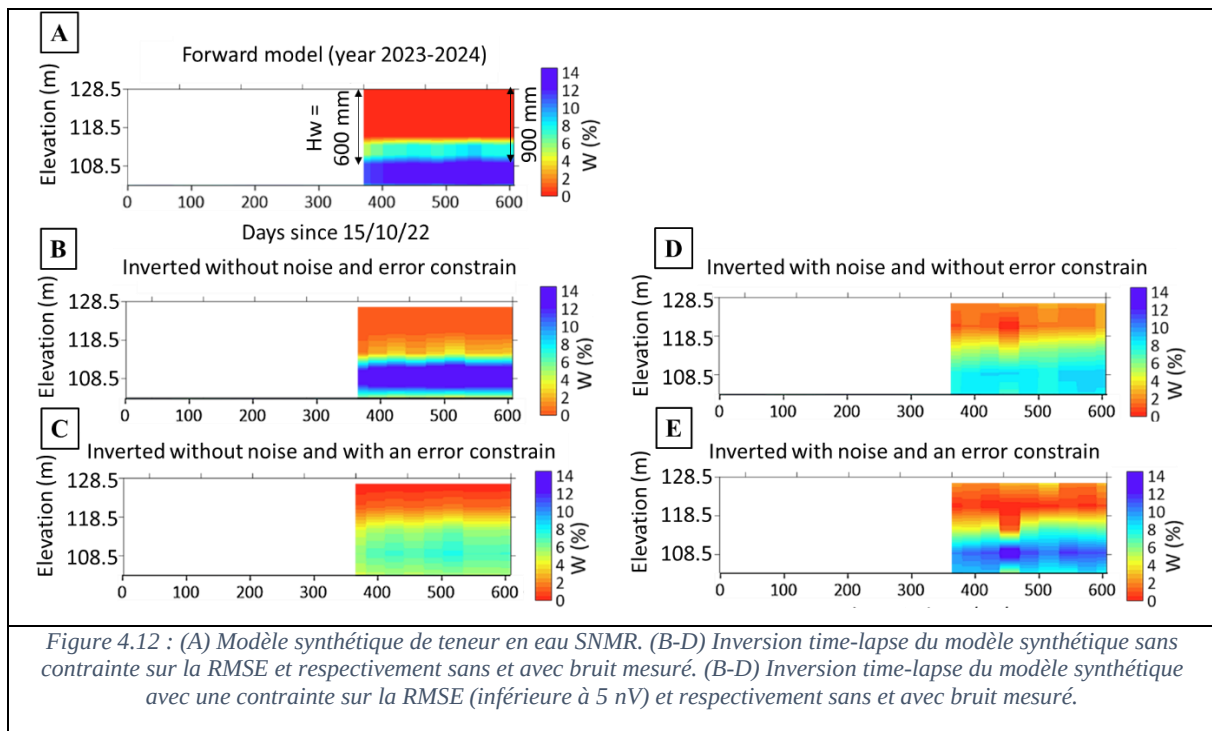
Inversion des sondages en time-lapse

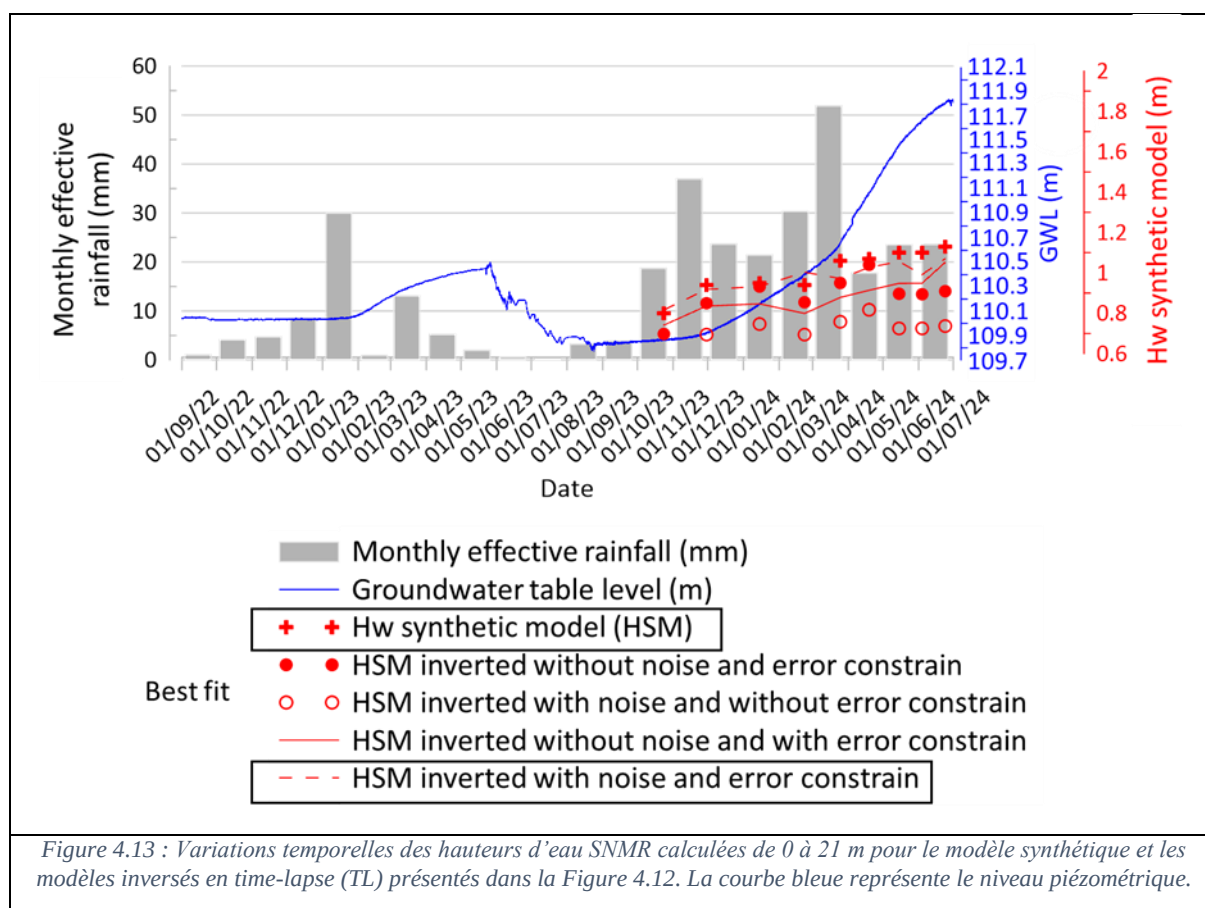
L'inversion time-lapse a d'abord été testée sur un modèle synthétique, différent de celui utilisé pour l'inversion 1D. En effet, le précédent modèle synthétique ne présentait pas de variations temporelles de teneur en eau et n'est donc pas pertinent pour une inversion time-lapse. La Figure 4.12.A montre le modèle synthétique qui a été utilisé. Ce modèle est construit avec une augmentation de la hauteur d'eau SNMR de 300 mm entre octobre 2023 (600 mm) et juin 2024 (900 mm). Cette augmentation de la hauteur d'eau SNMR est traduite par une augmentation progressive de la teneur en eau dans la ZNS. Le modèle synthétique évolutif est inversé avec et sans ajout du bruit ambiant mesuré. Différents paramètres d'inversion time-lapse sont testés :

- 1) Une inversion automatique en amplitude avec 2 à 3 itérations et une RMSE à environ 20 nV.
- 2) Une inversion avec une contrainte sur la RMSE qui doit être inférieure à 15 nV impliquant plus d'itérations.

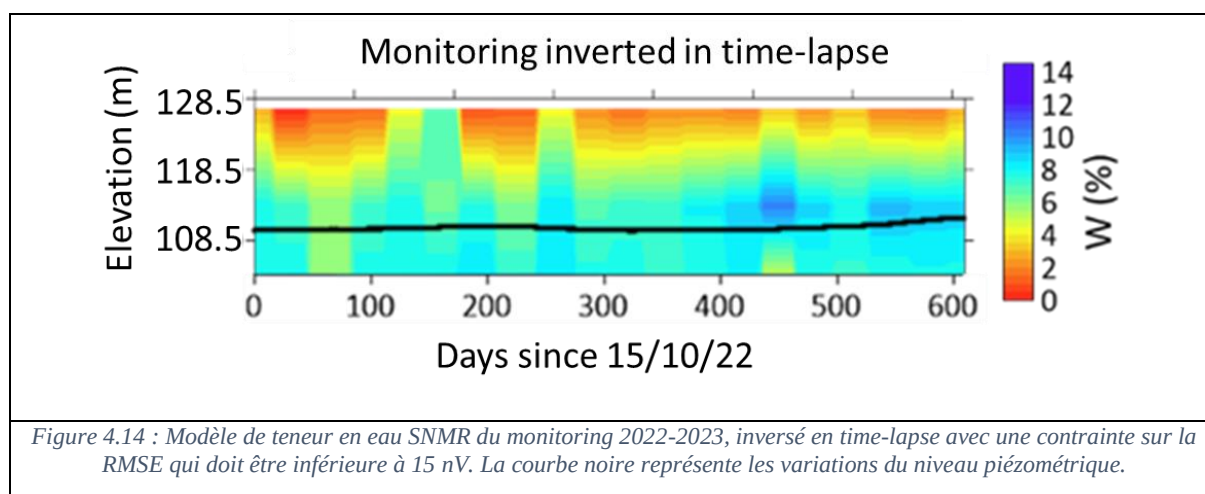
Les Figure 4.12.B et Figure 4.12.D montrent les modèles inversés sans contrainte sur la RMSE, respectivement sans et avec ajout du bruit ambiant mesuré. Les Figure 4.12.C et Figure 4.12.E montrent les modèles inversés avec une contrainte sur la RMSE (inférieure à 15 nV), respectivement sans et avec ajout du bruit ambiant mesuré. La Figure 4.13 présente l'évolution de la hauteur d'eau SNMR calculée à partir des modèles de la Figure 4.12, modèle synthétique et les résultats d'inversion time-lapse. Par rapport au modèle synthétique :

- L'inversion time-lapse sans bruit reproduit globalement les variations de la hauteur d'eau par rapport au modèle synthétique mais avec des valeurs inférieures. De plus, le modèle inversé sans contrainte sur la RMSE reproduit mieux la distribution de teneur en eau en fonction de la profondeur que le modèle inversé avec contrainte sur la RMSE. Enfin le modèle inversé sans contrainte sur la RMSE est plus stable avec une valeur de la fonction de Tikhonov plus faible que pour le modèle inversé avec contrainte sur la RMSE.
- L'inversion time-lapse avec bruit réel reproduit également les variations de la hauteur d'eau par rapport au modèle synthétique. Les valeurs de hauteur d'eau SNMR sont similaires à celles du modèle synthétique pour l'inversion avec contrainte sur la RMSE et supérieures aux modèles inversés sans bruit. Pour la teneur en eau, le modèle inversé avec contrainte sur la RMSE reproduit mieux la distribution de teneur en eau du modèle synthétique et est plus stable que le modèle inversé sans contrainte sur la RMSE.



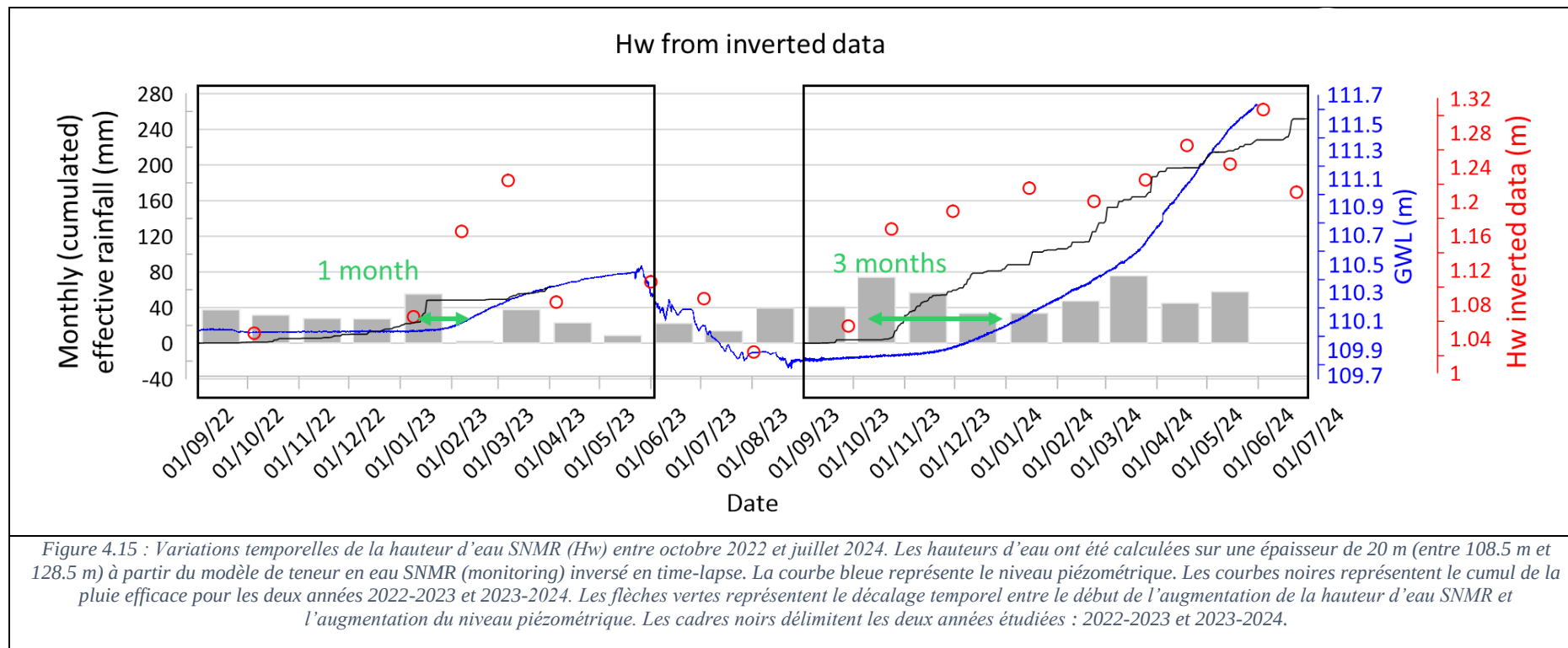


Suite à l'analyse de différents paramètres d'inversion sur le modèle synthétique, c'est l'inversion avec une contrainte sur la RMSE qui a été choisie pour l'inversion time-lapse des données du monitoring (Figure 4.14). **Le modèle inverse retenu est celui avec régularisation et a une erreur RMSE de 14.95 nV.**



Interprétation du modèle time-lapse et résultats

La Figure 4.15 montre l'évolution temporelle des hauteurs d'eau SNMR du monitoring, calculées entre 128.5 m et 107.5 m. Celle-ci est comparée aux variations du niveau piézométrique et au cumul de pluie efficace pour les années 2022-2023 et 2023-2024.



D'après la Figure 4.15, en comparant les variations de la hauteur d'eau SNMR, du niveau piézométrique et du cumul de pluie efficace, on observe :

- Pour l'année 2023-2024 : une corrélation entre l'augmentation de la hauteur d'eau SNMR et le cumul de pluie efficace sur la période. Le volume de pluie efficace cumulé est de 250 mm, cohérent avec la différence de hauteur d'eau SNMR sur la période qui est aussi de 250 mm. On observe également un délai de 3 mois entre l'augmentation de la hauteur d'eau SNMR et l'élévation du niveau piézométrique pendant la recharge, délai identique à celui observé par (Legchenko et al., 2022).
- Pour l'année 2022-2023 : une augmentation de la hauteur d'eau SNMR de 200 mm pour un cumul de pluie efficace de 60 mm et un décalage de 1 mois entre l'augmentation de la hauteur d'eau SNMR et celle du niveau piézométrique. Il n'y a pas de cohérence entre les variables pour l'année 2022-2023 comme c'était le cas pour l'année 2023-2024.

4.2.3 Discussion : condition de suivi time-lapse de la ZNS avec la SNMR

Plusieurs monitorings SNMR ont été mesurés sur le même site précédemment en 1999-2000 et en 2020-2021. D'après les Figure 1.10 et Figure 4.4, les conditions hydrométéorologiques varient selon les différentes années :

- Les années hydrologiques 1999-2000 et 2023-2024 présentent une recharge significative avec une élévation du niveau piézométrique respectivement de 3.5 m et de 2 m. De plus, elles présentent un volume de pluie efficace annuel élevé à environ 250 mm.
- Les années hydrologiques 2020-2021 et 2022-2023 ne présentent pas de recharge significatives avec une élévation du niveau piézométrique de moins de 50 cm. De plus, elles présentent un volume de pluie efficace annuel faible, respectivement à 150 mm (2020-2021) et 80 mm (2022-2023).

Pour les années hydrologiques sans recharge significative (2020-2021 et 2022-2023), d'après (Legchenko et al., 2022), le monitoring 2020-2021 ne montre pas d'augmentation de la hauteur d'eau SNMR. Pour l'année 2022-2023, on observe une augmentation de la hauteur d'eau SNMR, mais non cohérente avec le volume de pluie efficace cumulé avec une surestimation de 330 % de ce volume par la SNMR. De plus, l'augmentation de la hauteur d'eau n'est pas synchrone avec le cumul de pluie efficace et présente un décalage de 1 mois avec l'élévation du niveau piézométrique. Une hypothèse pour expliquer ces observations est que les monitorings 2020-2021 et 2022-2023 ont un volume de pluie efficace annuel trop faible et à la limite de significativité de la mesure de hauteur d'eau SNMR.

Pour les années hydrologiques avec une recharge significative, d'après (Legchenko et al., 2022), le monitoring 1999-2000 montre une cohérence en valeur et temporelle avec une augmentation de la hauteur d'eau SNMR de 200 mm par rapport à un volume de pluie efficace cumulé de 200 mm entre septembre 1999 et février 2000. Cette cohérence temporelle et de valeur de la pluie efficace et la hauteur d'eau SNMR, visible sur les deux années avec une recharge significative confirme la méthode dans ces conditions.

La Figure 4.16 présente une synthèse des comparaisons des résultats pour les différentes années de monitoring. D'après tous ces résultats, la période favorable pour que les mesures d'hauteur d'eau SNMR soient significatives correspond à une année hydrologique avec un volume de pluie efficace annuel significatif à environ 250 mm. Dans ce cas, le monitoring SNMR permet d'estimer un volume d'eau infiltré en comparaison avec le cumul de pluie efficace. Lorsque le volume de pluie efficace annuel est inférieur à 100 mm, le volume est à la limite de significativité pour la mesure des hauteurs d'eau SNMR.

Monitoring	Hw consistent with CER	Hw and CER synchronous	Delay with GWL increase	Annual effective rainfall
2022-2023	No	Yes	1 month	Low
2023-2024	Yes	Yes	3 months	High
1999-2000	Yes	Yes	3 months	High
2020-2021	No	Yes	2 months	Low

Figure 4.16 : Synthèse de la comparaison des résultats pour les différentes années de monitoring. Les lignes surlignées en vert représentent les années favorables pour faire un monitoring de teneur en eau SNMR et les lignes surlignées en orange présentent les années défavorables.

Chapitre 4.3 :Synthèse

Les objectifs étaient d'une part d'analyser la réponse SNMR au suivi de stock d'eau dans la ZNS dans les conditions hydrologiques de 2022-2024 et de la comparer aux réponses des monitorings existants sur le même site GB en 1999-2000 et 2020-2021, mesurés dans des conditions hydrologiques différentes. D'autre part, cette comparaison avait pour objectif de confirmer la robustesse de la méthode SNMR pour suivre les stocks d'eau dans la ZNS et d'en préciser les conditions hydrologiques le permettant.

Le monitoring a été mesuré pendant deux années hydrologiques : 2022-2023, année présentant une recharge faible et 2023-2024 présentant une recharge importante. Les résultats pour l'année 2023-2024 montre que l'augmentation de la hauteur d'eau SNMR mesurée est synchrone et est égale au cumul de la pluie efficace correspondant à la lame d'eau infiltrée dans notre cas. Cette augmentation a lieu 3 mois avant l'élévation du niveau piézométrique, correspondant au temps de transfert de la lame d'eau. Ces résultats sont cohérents avec ceux observés lors du monitoring 1999-2000 par (Legchenko et al., 2020, 2022) avec également une augmentation de la hauteur d'eau SNMR synchrone et égale à la lame d'eau infiltrée et avec un délai de 3 mois avant l'élévation du niveau piézométrique. Les années 1999-2000 et 2023-2024 sont dans des conditions hydrologiques similaires c'est-à-dire avec un volume de pluie efficace annuel élevé à environ 250 mm. Pour l'année 2022-2023, présentant un faible volume de pluie efficace annuel (80 mm), une augmentation de la hauteur d'eau SNMR est mesurée mais celle-ci n'est pas synchrone avec la lame d'eau infiltrée et la surestime. Le monitoring 2020-2021 (Legchenko et al., 2022), présentant également un faible volume de pluie efficace annuelle (100 mm), ne présentait pas d'augmentation de hauteur d'eau SNMR et la recharge n'était pas significative.

Ces résultats permettent de définir les conditions de suivi de stock d'eau dans la ZNS avec la SNMR c'est-à-dire lors des années hydrologiques présentant une recharge avec un volume de pluie efficace annuel significatif à 250 mm. Dans ce cas, le suivi de la hauteur d'eau SNMR permet de suivre la lame d'eau infiltrée dans la ZNS. En effet, l'augmentation de la hauteur d'eau SNMR est synchrone avec le cumul de la pluie efficace correspondant à la lame d'eau infiltrée et les deux paramètres ont le même volume total. L'augmentation de la lame d'eau infiltrée a lieu 3 mois avant l'élévation du niveau piézométrique.

Conclusion générale

La problématique générale de ce travail est d'améliorer les modèles de transferts hydriques de la ZNS en milieu calcaire complexe, en tenant compte des hétérogénéités hydriques et lithologiques locales (altération, fractures, karst). Ceci s'applique notamment dans le contexte de suivi d'infiltration de polluants dans la ZNS, nécessitant une connaissance des hétérogénéités locales afin de calculer et modéliser des temps de transferts rendant au mieux compte de la réalité du sous-sol. L'étude est faite sur le site d'étude de Villamblain dans l'Aquifère de Beauce, sujet à la problématique d'infiltration des nitrates dans la zone non saturée et la nappe. Les objectifs de cette étude étaient : (1) De caractériser, avec les méthodes géophysiques, les hétérogénéités lithologiques et hydriques de la ZNS pouvant influencer les temps de transfert dans la ZNS en vue d'améliorer les modèles hydrogéologiques. (2) De définir les conditions de suivi du stock d'eau dans la ZNS avec un monitoring SNMR en fonction des conditions hydrométéorologiques. (3) De proposer un modèle amélioré des transferts hydriques dans la ZNS de Villamblain, tenant compte des hétérogénéités lithologiques et hydriques locales.

Ce travail a permis de mettre en évidence les hétérogénéités lithologiques et hydriques (calcaire argileux, fractures, karst) dans la ZNS à l'échelle décamétrique, décrites par des anomalies de teneur en eau SNMR, de résistivité électrique et de chargeabilité dans un modèle 3D décamétrique et précisé par les données de teneur en eau BNMR, T_2 BNMR, BER et densité mesurés en forage. Ainsi, un modèle lithologique « hydro-géophysique » a été construit tenant compte de ces hétérogénéités à l'échelle décamétrique sur le site OZNS. L'interprétation jointe des teneurs en eau BNMR et des porosités d'Archie saturées calculées avec les données BER, a mis en évidence que ces méthodes peuvent mesurer la porosité effective à l'échelle métrique (forage), cohérentes avec celles mesurées en laboratoire. L'interprétation des teneurs en eau SNMR et BNMR pour $T_2 > 40$ ms, a permis de construire un modèle de teneur en eau mesurable par SNMR et BNMR. Une estimation de l'augmentation de la hauteur d'eau dans la ZNS associée à la recharge faite sur ce modèle montre des teneurs en eau cohérentes avec les données mesurées lors des monitorings SNMR de suivi de stock d'eau. De plus, ces modèles de lithologie et de teneur en eau sont applicables au site GB, permettant de généraliser les résultats au site de Villamblain. Les résultats de suivi du stock d'eau dans la ZNS par monitoring SNMR ont montré que celui-ci est robuste pour les années hydrologiques avec un volume de pluie efficace annuel élevé à 250 mm. Dans ce cas, l'augmentation de hauteur d'eau SNMR reproduit la lame d'eau infiltrée dans la ZNS de façon synchrone et trois mois avant l'élévation du niveau piézométrique. Ce délai de trois mois, en accord avec le délai des modèles hydrogéologiques existants notamment calés sur des mesures lysimétriques, correspond au temps de transfert de la porosité de fracture, caractérisées à l'échelle décamétrique. Cela apporte une nouvelle information par rapport au temps de transfert de la matrice calcaire associée au cycle de recharge pluriannuel.

Pour apporter une caractérisation complète de la ZNS localement à l'échelle multi-décamétrique, plusieurs perspectives sont possibles : (1) Le monitoring SNMR réalisé actuellement permet de caractériser des temps de transfert attribués à la porosité de fracture de l'ordre de 3 mois. Notre description des hétérogénéités comprend du karst qui permet d'envisager des temps de transfert plus courts. Nous recommandons de poursuivre le suivi des stocks d'eau dans le massif calcaire du site OZNS avec un monitoring de teneur en eau SNMR

à pas de temps réduit de l'ordre de la journée/semaine afin d'estimer les temps de transferts rapides des karsts.

(2) Afin de mieux cerner la complexité à l'échelle métrique ou pluri-métrique nous recommandons également d'engager un monitoring explorant les différentes réponses de teneur de milieux aux caractéristiques variées notamment entre les zones plus ou moins fissurées et plus ou moins altérées révélées par notre étude. La section NS passant par les forages SC6, SC3 et SC1 se prêtera particulièrement à cet exercice. Cela peut être fait avec la SNMR combinée à des mesures en forage (BER / BNMR) et entre forage (radar transmission). Ce travail a déjà été engagé sur la recharge 2023/2024. Les boucles décimétriques SNMR développées et installées durant la présente thèse pourront être mises en œuvre à cette occasion pour affiner la comparaison à une même échelle des teneurs en eau mesurées par la SNMR avec celles mesurées par BNMR et par gravimétrie.

(3) Enfin, la construction de nouveaux modèles de transferts hydriques numériques sur la base de paramètres physiques comme Hydrus, tenant compte des hétérogénéités mises en évidence à l'échelle décimétrique et calés sur le suivi de stock d'eau dans la ZNS par monitoring SNMR, permettra d'améliorer la modélisation des transferts dans la ZNS et préciser les simulations de transfert de polluant à l'échelle décimétrique.

Références

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128725>
- Abbas, M., Jodry, C., Mallet, C., Azaroual, M., 2021. CARACTERISATION DE L'HETEROGENEITE DE LA ZONE NON-SATUREE A L'ENDROIT DE L'OBSERVATOIRE O-ZNS PAR UNE APPROCHE HYDROGEOPHYSIQUE MULTI-METHODES. Presented at the GEOFCAN.
- AELB, 2019. Etat des lieux du bassin Loire-Bretagne - 12/12/2019 - Données et documents - Agence de l'eau Loire-bretagne [WWW Document]. URL <https://donnees-documents.eau-loire-bretagne.fr/home/documents/etat-des-lieux/etat-des-lieux-du-bassin-loire-bretagne---12122019.html> (accessed 5.22.24).
- Aldana, C., 2019. Etude des propriétés de transfert de la zone non saturée : application aux calcaires aquitaniens de l'aquifère de Beauce (Thèse de doctorat). Université d'Orléans.
- 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, e20127. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20127>
- Archie, G.E., 1942. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Transactions of the AIME* 146, 54–62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>
- Baltassat, J.-M., Deparis, J., Gaudot, I., Jacob, T., Kessouri, P., Ammor, S., Bitri, A., 2025. Caractérisation géophysique du site de l'Observatoire O-ZNS de Villamblain (45) (No. RP-72842-FR). BRGM.
- Behroozmand, A.A., Keating, K., Auken, E., 2015. A Review of the Principles and Applications of the NMR Technique for Near-Surface Characterization. *Surv Geophys* 36, 27–85. <https://doi.org/10.1007/s10712-014-9304-0>
- 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, 3837–3866. <https://doi.org/10.1002/2015WR017016>
- Bonnet, M., Floriat, S., 2004. Reprise du modèle de gestion de la nappe de Beauce. PHASE 1 - Calage en régime permanent et transitoire (No. RPP04M026b). Hydroexpert.
- Castany, G., 1998. Hydrogéologie : principes et méthodes. Dunod, Paris.
- Commisariat général au développement durable, 2013. Le point sur : Les teneurs en nitrates augmentent dans les nappes phréatiques jusqu'en 2004 puis se stabilisent mais de fortes disparités régionales existent. Observation et statistiques. 4.
- Comte, J.-C., Ofterdinger, U., Legchenko, A., Caulfield, J., Cassidy, R., Mézquita González, J.A., 2019. Catchment-scale heterogeneity of flow and storage properties in a weathered/fractured hard rock aquifer from resistivity and magnetic resonance surveys: implications for groundwater flow paths and the distribution of residence times. *Geological Society, London, Special Publications* 479, 35–58. <https://doi.org/10.1144/SP479.11>
- Covington, M.D., Martin, J.B., Toran, L.E., Macalady, J.L., Sekhon, N., Sullivan, P.L., García Jr., Á.A., Heffernan, J.B., Graham, W.D., 2023. Carbonates in the Critical Zone. *Earth's Future* 11, e2022EF002765. <https://doi.org/10.1029/2022EF002765>

- Darcy, H., 1856. Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau. Victor Dalmont.
- de Frutos Cachorro, J., Erdlenbruch, K., Tidball, M., 2017. A dynamic model of irrigation and land-use choice: application to the Beauce aquifer in France. *European Review of Agricultural Economics* 44, 99–120. <https://doi.org/10.1093/erae/jbw005>
- Dunn, K.-J., Bergman, D.J., LaTorraça, G.A., 2002. *Nuclear Magnetic Resonance: Petrophysical and Logging Applications*. Elsevier.
- Durner, W., 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research* 30, 211–223. <https://doi.org/10.1029/93WR02676>
- Flinchum, B.A., Holbrook, W.S., Parsekian, A.D., Carr, B.J., 2019. Characterizing the Critical Zone Using Borehole and Surface Nuclear Magnetic Resonance. *Vadose Zone Journal* 18, 180209. <https://doi.org/10.2136/vzj2018.12.0209>
- Flipo, N., Monteil, C., Poulin, M., de Fouquet, C., Krimissa, M., 2012. Hybrid fitting of a hydrosystem model: Long-term insight into the Beauce aquifer functioning (France). *Water Resources Research* 48, 21. <https://doi.org/10.1029/2011WR011092>
- Hermans, T., Goderniaux, P., Jougnot, D., Fleckenstein, J.H., Brunner, P., Nguyen, F., Linde, N., Huisman, J.A., Bour, O., Lopez Alvis, J., Hoffmann, R., Palacios, A., Cooke, A.-K., Pardo-Álvarez, Á., Blazeovic, L., Pouladi, B., Haruzi, P., Fernandez Visentini, A., Nogueira, G.E.H., Tirado-Conde, J., Looms, M.C., Kenshilikova, M., Davy, P., Le Borgne, T., 2023. Advancing measurements and representations of subsurface heterogeneity and dynamic processes: towards 4D hydrogeology. *Hydrology and Earth System Sciences* 27, 255–287. <https://doi.org/10.5194/hess-27-255-2023>
- Isch, A., Coquet, Y., Abbar, B., Aldana, C., Abbas, M., Bruand, A., Azaroual, M., 2022. A comprehensive experimental and numerical analysis of water flow and travel time in a highly heterogeneous vadose zone. *Journal of Hydrology* 610, 127875. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127875>
- 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. Presented at the GEOFCAN 2018, Antony, France.
- Knight, R., Grunewald, E., Irons, T., Dlubac, K., Song, Y., Bachman, H.N., Grau, B., Walsh, D., Abraham, J.D., Cannia, J., 2012. Field experiment provides ground truth for surface nuclear magnetic resonance measurement. *Geophysical Research Letters* 39. <https://doi.org/10.1029/2011GL050167>
- Kosugi, K., 1994. Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention. *Water Resources Research* 30, 891–901. <https://doi.org/10.1029/93WR02931>
- Legchenko, A., 2021. *Surface NMR for Hydrogeology: A user's guide*. IOP Publishing.
- Legchenko, A., Baltassat, J.-M., Abbas, M., Isch, A., Amraoui, N., Azaroual, M., Deparis, J., Ryckebusch, C., Kessouri, P., 2022. Monitoring unsaturated water flow using magnetic resonance soundings. *Journal of Hydrology* 612, 128318. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128318>
- Legchenko, A., Baltassat, J.-M., Duwig, C., Boucher, M., Girard, J.-F., Soruco, A., Beauce, A., Mathieu, F., Legout, C., Descloitres, M., Gabriela Patricia, F.A., 2020. Time-lapse magnetic resonance sounding measurements for numerical modeling of water flow in variably saturated media. *Journal of Applied Geophysics* 175, 103984. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.103984>
- Legchenko, A., Comte, J.-C., Ofterdinger, U., Vouillamoz, J.-M., Lawson, F.M.A., Walsh, J., 2017. Joint use of singular value decomposition and Monte-Carlo simulation for estimating uncertainty in surface NMR inversion. *Journal of Applied Geophysics* 144, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.06.010>

- Legchenko, A., Descloitres, M., Vincent, C., Guyard, H., Garambois, S., Chalikakis, K., Ezersky, M., 2011. Three-dimensional magnetic resonance imaging for groundwater. *New J. Phys.* 13, 025022. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/13/2/025022>
- Legchenko, A., Valla, P., 2003. Removal of power-line harmonics from proton magnetic resonance measurements. *Journal of Applied Geophysics* 53, 103–120. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(03\)00041-7](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(03)00041-7)
- Legchenko, A., Valla, P., 2002. A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements. *Journal of Applied Geophysics, Surface Nuclear Magnetic Resonance: What is Possible?* 50, 3–19. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00127-1](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00127-1)
- Legtchenko, A., 2013. *Magnetic Resonance Imaging for Groundwater*. John Wiley & Sons.
- Lesparre, N., Girard, J.-F., Jeannot, B., Weill, S., Dumont, M., Boucher, M., Viville, D., Pierret, M.-C., Legchenko, A., Delay, F., 2020. Magnetic resonance sounding measurements as posterior information to condition hydrological model parameters: Application to a hard-rock headwater catchment. *Journal of Hydrology* 587, 124941. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124941>
- Lubczynski, M., Roy, J., 2005. MRS contribution to hydrogeological system parametrization. *Near Surface Geophysics* 3, 131–139. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005009>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105050>
- Mallet, Céline, Jodry, C., Isch, A., Laurent, G., Deparis, J., Azaroual, M., 2022. Multi-geophysical Field Measurements to Characterize Lithological and Hydraulic Properties of a Multi-scale Karstic and Fractured Limestone Vadose Zone: Beauce Aquifer (O-ZNS), in: Di Mauro, A., Scozzari, A., Soldovieri, F. (Eds.), *Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management*, Springer Water. Springer International Publishing, Cham, pp. 461–484. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7_19
- Martin, J.C., 2000. Etudes préalables à la réalisation d'un modèle de gestion de la nappe de Beauce. Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère. Mesure de la transmissivité et du coefficient d'emménagement (No. BRGM/RP-50348-FR). BRGM.
- Martin, J.C., Giot, D., Le Nindre, Y.M., 1999. Etudes préalables à la réalisation d'un modèle de gestion de la nappe de Beauce. Géométrie du réservoir et limites de la nappe de Beauce (No. R 40571). BRGM.
- Mazzilli, N., Boucher, M., Chalikakis, K., Legchenko, A., Jourde, H., Champollion, C., 2016. Contribution of magnetic resonance soundings for characterizing water storage in the unsaturated zone of karst aquifers. *GEOPHYSICS* 81, WB49–WB61. <https://doi.org/10.1190/geo2015-0411.1>
- Mazzilli, N., Chalikakis, K., Carrière, S., Legchenko, A., 2020. Surface Nuclear Magnetic Resonance Monitoring Reveals Karst Unsaturated Zone Recharge Dynamics during a Rain Event. *Water* 12. <https://doi.org/10.3390/w12113183>
- Monteil, C., 2011. Estimation de la contribution des principaux aquifères du bassin versant de la Loire au fonctionnement hydrologique du fleuve à l'étiage. Ecole Nationales des Mines de Paris.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12, 513–522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- Müller-Huber, E., Schön, J., Börner, F., 2015. The effect of a variable pore radius on formation resistivity factor. *Journal of Applied Geophysics* 116, 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.03.011>

- Müller-Petke, M., Hiller, T., Herrmann, R., Yaramanci, U., 2011. Reliability and limitations of surface NMR assessed by comparison to borehole NMR. *Near Surface Geophysics* 9, 123–134. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2010066>
- Ould Mohamed, S.-A., 1995. Etude du fonctionnement hydrique hivernal d'un sol limono-argileux de Petite Beauce : Application d'un modèle d'infiltration et incidence sur la lixiviation du nitrate. Orléans.
- Richards, L.A., 1931. CAPILLARY CONDUCTION OF LIQUIDS THROUGH POROUS MEDIUMS. *Physics* 1, 318–333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>
- Ryckebusch, C., Baltassat, J.-M., Abbar, B., Abbas, M., Ardito, L., Legchenko, A., Azaroual, M., Kessouri, P., 2025. Installation de boucles RMP décimétriques dans le puits de la plateforme PIVOTS O-ZNS à Villamblain (45) (No. RP-7168-FR). BRGM.
- SAGE, 2013a. Documents constitutifs du SAGE - Synthèse de l'état des lieux. Sage. URL <https://www.sage-beauce.fr/documents-constitutifs-du-sage/> (accessed 5.22.24).
- SAGE, 2013b. Documents constitutifs du SAGE - Rapport de présentation. Sage. URL <https://www.sage-beauce.fr/documents-constitutifs-du-sage/> (accessed 5.22.24).
- Schnebelen, N., 2000. Analyse et modélisation de l'impact de la maîtrise des pratiques agricoles sur la pollution diffuse par les nitrates : application à l'aquifère des Calcaires de Beauce, site de Villamblain (These de doctorat). Orléans.
- Schnebelen, N., Ledoux, E., Bruand, A., Creuzot, G., 1999. Stratification hydrogéochimique et écoulements verticaux dans l'aquifère des calcaires de Beauce (France): Un système anthropisé à forte variabilité spatiale et temporelle. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* 329, 421–428. [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(00\)80066-X](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(00)80066-X)
- Seguin, J.-J., 2016. Analyse de quinze séries piézométriques de la nappe des Calcaires de Beauce. (No. RP-65964-FR). BRGM.
- Serra, O., Serra, L., 2003. Well logging and geology.
- Singha, K., Johnson, T.C., Day-Lewis, F.D., Slater, L.D., 2022. Electrical Imaging for Hydrogeology. *The Groundwater Project*.
- Spellman, P., Breithaupt, C., Bremner, P., Gulley, J., Jenson, J., Lander, M., 2022. Analyzing Recharge Dynamics and Storage in a Thick, Karstic Vadose Zone. *Water Resources Research* 58, e2021WR031704. <https://doi.org/10.1029/2021WR031704>
- Sullivan, P.L., Zhang, C., Behm, M., Zhang, F., Macpherson, G.L., 2020. Toward a new conceptual model for groundwater flow in merokarst systems: Insights from multiple geophysical approaches. *Hydrological Processes* 34, 4697–4711. <https://doi.org/10.1002/hyp.13898>
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- Thiery, D., 2014. Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d'utilisation. Rapport final (No. BRGM/RP-62797-FR). BRGM.
- van Genuchten, M.Th., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Vouillamoz, J.-M., 2003. La caractérisation des aquifères par une méthode non invasive : les sondages par résonance magnétique protonique (These de doctorat). Paris 11.

Annexe 1 : Résumé de l'oral présenté à la conférence internationale EGU 2023

Vadose zone water content characterization of a heterogeneous limestone by 3D-SNMR

Clémence Ryckebusch^{1,2}, Jean-Michel Baltassat¹, Anatoly Legchenko³, Pauline Kessouri¹, Nadia Amraoui¹, Mohamad Abbas², Mohamed Azaroual^{1,2}

¹BRGM, 3 av. Claude Guillemin, 45100 Orléans, France. (c.ryckebusch@brgm.fr)

²Université d'Orléans, CNRS, BRGM, ISTO, UMR 7327, F-45071, Orléans, France

³Université Grenoble Alpes, IRD, IGE, Grenoble, France

In the current climate change context, the quality and availability of water resource are important society issues. Indeed, the consumption of water and fertilizers by farms and their discharge into the soil and aquifers leads to a critical environmental situation. To manage the effect and fate of these contaminations, it is necessary to have a relevant knowledge of the vadose zone dynamics and exchanges especially flow paths from the soil to the deep aquifers. Parts of the vadose zone are well studied such as the first meters with an adapted instrumentation, and the water table properties with piezometric measurements and pumping tests. The geophysical methods allow studying the deep vadose zone properties. The surface nuclear magnetic resonance (SNMR) is a direct geophysical method based on the protons magnetic resonance to measure water content in the subsurface. This method can be used to detect the water table level coupled with hydrogeological measurements (piezometric measurements and pumping tests) or to characterize aquifers properties and boundaries coupled with other geophysical methods (electrical, EM or gravimetric methods).

The current study is carried out in Villamblain (France) at the heart of the Beauce region; one of the most cultivated and highly nitrate-contaminated area in France. The vadose zone is a highly heterogeneous limestone with geochemical alteration, complex network of fractures and karstification. This field site was chosen to develop an observatory of transfers in the Vadose Zone named O-ZNS (<https://plateformes-pivots.eu/o-zns/>). This observatory consists of an exceptional well (20 m-deep and 4 m-diameter) equipped with multiple sensors and accessible for direct characterization of the heterogeneous vadose zone, surrounded by 8 boreholes used for water sampling, geophysical well-logging, piezometric level monitoring and vadose zone geochemical properties monitoring.

In this study, the SNMR method is used (1) to characterize the spatial heterogeneities of the 3D aquifer and of the vadose zone limestone, in a 3D-model jointly interpreted with other geophysical measurements (3D-ERT, 3D-IP, gravimetric, GPR profiles) and soundings; (2) to characterize the vadose zone water content, in combination with GPR and NMR logging water content profiles. Both these works are ongoing.

This research aims to know more accurately the vadose zone water content measured by SNMR in the context of a heterogeneous limestone with the goal to monitor the vadose zone flow dynamics with time-lapse measurements coupled with hydrogeological measurements.

Annexe 2 : Résumé étendu présenté à la conférence française GEOFCAN 2023

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

RYCKEBUSCH C.^{1,2}, BALTASSAT J.-M.¹, DEPARIS J., KESSOURI P.¹, LEGCHENKO A.³, AMRAOUI N.¹, ABBAS M.², AZAROUAL M.^{1,2}

¹BRGM, 45100 Orléans, France. (c.ryckebusch@brgm.fr)

²Université d'Orléans, CNRS, BRGM, ISTO, UMR 7327, F-45071, Orléans, France

³Université 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 décamétrique 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: 4 to 6 keywords

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.

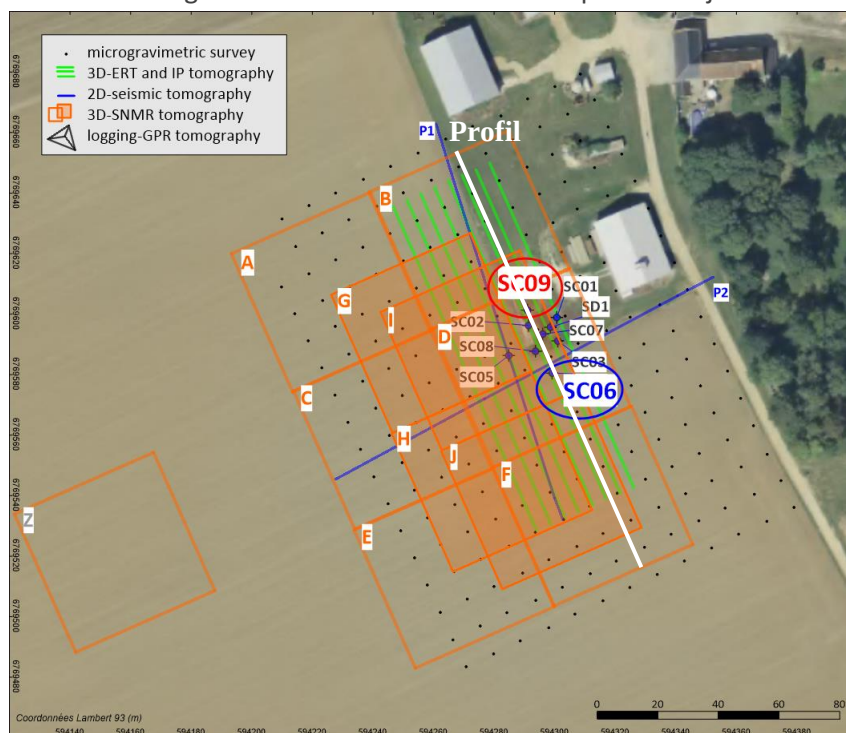


Fig. 1- Localisation des forages et des données géophysiques multi-méthodes acquises sur le site lors de la campagne de 2020.

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.

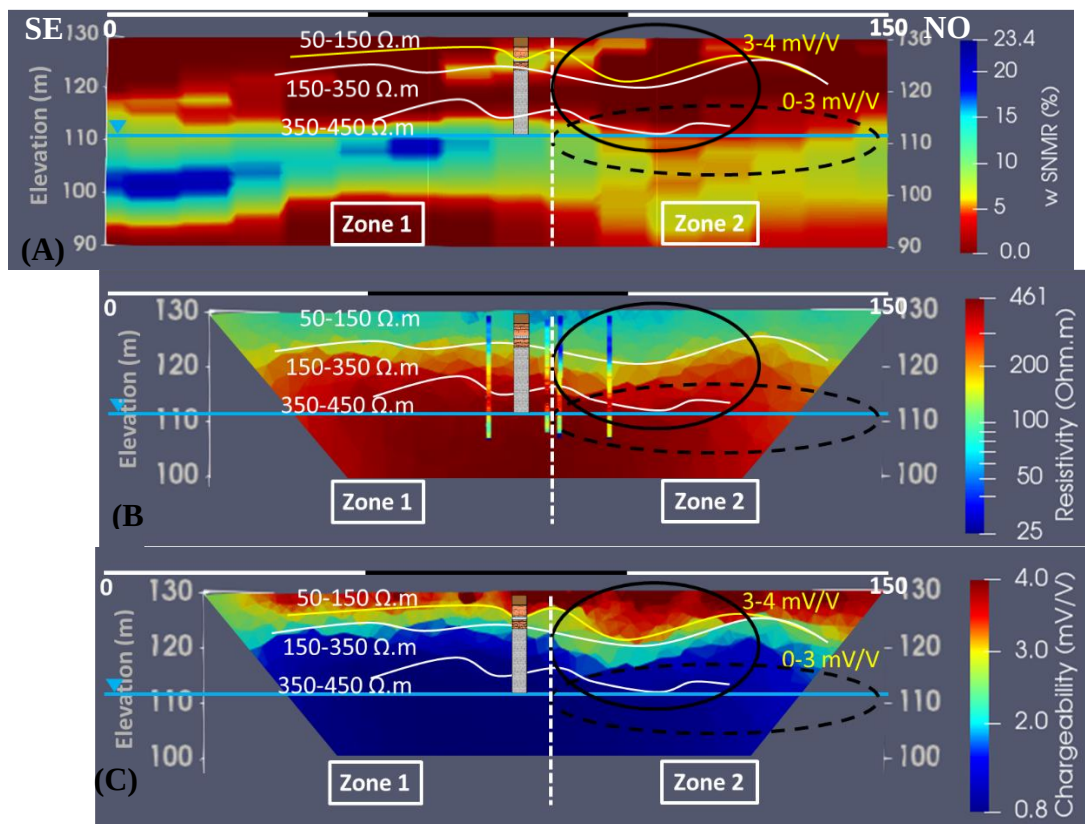


Fig. 2– Profils NS de (A) teneur en eau RMP, (B) résistivité électrique, (C) chargeabilité, interprétés avec la zone 1 et la zone 2 présentant une anomalie RMP (cercle noir trait pointillé) et une anomalie électrique (cercle noir trait plein).

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.

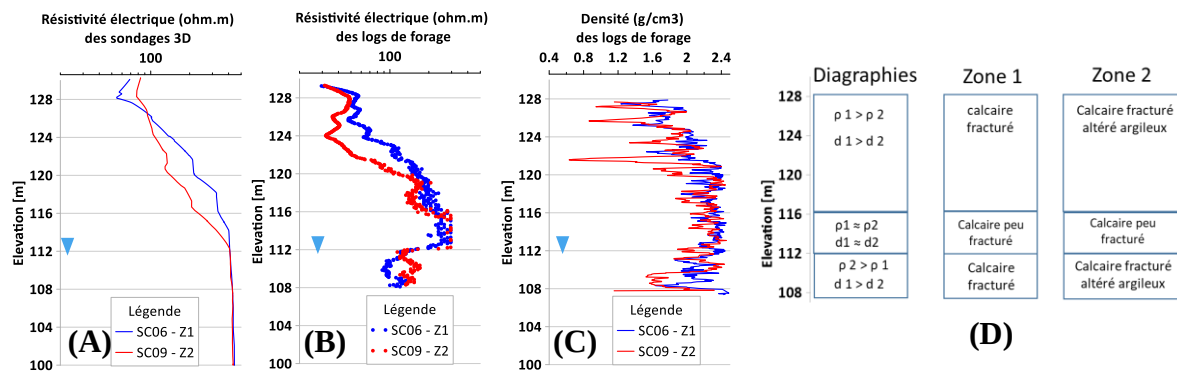


Fig 3 – Logs SC06 (zone 1) et SC09 (zone 2) : de résistivité électrique (A) extrait du modèle 3D, (B) en forage ; (C) densité en forage ; (D) Modèle synthétique des informations issues des forages pour les zones 1 et 2 avec p la résistivité et d la densité.

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) jusqu'à 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 décamétrique (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.

Annexe 3 : Publication soumise au journal *Near Surface Geophysics*

Title

Characterization of a heterogeneous limestone vadose zone based on a multimethod and multiscale geophysical approach

Short title less than 50 characters

Vadose zone characterization using geophysics

Full names of authors

Clémence RYCKEBUSCH^{1,2}, Jean-Michel BALTASSAT¹, Anatoly LEGCHENKO³, Pauline KESSOURI¹, Jacques DEPARIS¹, Nadia AMRAOUI¹, Mohamed AZAROUAL^{1,2}

Affiliations

¹BRGM, 45100 Orléans, France.

²ISTO, UMR 7327, Université Orléans, CNRS, BRGM, OSUC, F-45071 Orléans, France

³Université Grenoble Alpes, IRD, IGE, Grenoble, France

Acknowledgments

The authors thank the Région Centre-Val de Loire (HYMAGE-OZNS project 2020-2024, PhD thesis 2021-2024) and the French Ministry of Higher Education and Research (HYMAGE-OZNS project, PhD thesis, BRGM public service) for their financial support.

They thank Clara Jodry and Salma Ammor who participated to the data acquisition.

The authors declare no conflicts of interest.

Abstract (less than 300 words)

Water resource is an important society issue. As it is more and more limited, its distribution, usage and contamination are of vital importance. In the Beauce region, there are issues on both the water quality and quantity because of farming and the related groundwater contamination. Because the water is a vector of contamination, these issues require a precise vadose zone water content characterization taking in account the site lithology and water content heterogeneities. We apply a multiscale and multimethod geophysical approach to integrate the limestone heterogeneity at various scales into the characterization. In a first step, at a multi-decametric scale, the joint interpretation of a 3D surface nuclear magnetic resonance water content (SNMR), electrical resistivity and chargeability models allows to distinguish zones with limestone heterogeneities (clay content, fractures) related to geophysical anomalies. At a decimeter scale, the joint interpretation of borehole nuclear magnetic resonance (BNMR) water content, borehole electrical resistivity (BER) and density logs in each zone allows us to precise the spatial fractures and karstifications levels in the lower saturated and unsaturated limestone from the interpretations done at larger scale. The second step is to characterize the water content variations to build a water content model of the site. The comparison of the water content measured by BNMR and the saturated Archie porosity calculated with BER data, allows to interpret the BNMR water content as an effective porosity. The comparison of the SNMR and BNMR water content larger than 40 ms (the SNMR dead time) into the aquifer shows a good agreement of both the variations and the values. Moreover, an estimation of the water column increase in the vadose zone during the infiltration process is in agreement with previous measurements. That shows that our model can be applied to follow the vadose zone dynamic.

Keywords: nuclear-magnetic-resonance, site characterization, electrical resistivity tomography, heterogeneity, hydrogeophysics

Data availability statement

The data is available upon request.

Introduction

Water resource is more and more limited. Its distribution, usage and contamination are of vital importance. In the Beauce region, one of the most cultivated and dry area in France (de Frutos Cachorro et al., 2017), the aquifer is under a high water stress with water being used both by the population and the intensive agriculture. Moreover, because of the agriculture activities, the region is one of the highest nitrate-contaminated area in France (Commisariat général au développement durable, 2013; SAGE, 2013a, 2013b). In this area, the aquifer is not protected by an impervious layer. Therefore, the water and the contaminants infiltrate the soil and the aquifer, where the water is pumped. To quantify this contamination and its infiltration into the vadose zone, it is necessary to improve the knowledge of the unsaturated groundwater flow, vector of this contamination.

In hydrodynamic modeling, the vadose zone is often presented as a 1D transit of surface water to the aquifer assuming homogeneous sources (rainfall, runoff) and sinks (evapotranspiration). This approach allows for estimating the mean flow value. However, two flux dynamics at various scales exist in the vadose zone (Hermans et al., 2023): (1) the recharge flux and water balance at the catchment scale with a transition time comprised from months to centuries. Jointly processing water flow calculated from 1D Hydrus modelling and time-lapse SNMR data measured each month during one year, Legchenko et al., (2020) showed that the SNMR water column is coherent with the cumulated effective rainfall in the vadose zone with a 3-months delay before the water level response. Monteil, (2011) and Flipo et al., (2012) found a value of 25 days with a water balance model of the Beauce aquifer at a regional scale. Both of these transition time values correspond to the seasonal transition time that Schnebelen, (2000)

estimated between 15 and 45 days for normal years and between 2 and 3 months for dry years. With water content values and hydraulic conductivity curves measured in lab, Aldana, (2019) estimated a transition time of 30 years in the vadose zone of the study site. This transition time corresponds to the matrix infiltration with a plurennial transition time.

Geological heterogeneities have an effect on the infiltration and contamination tranfert velocities. The phenomena are at variable scales from pore scale to decametric scale, with transition times from seconds to hours. Integration of the inhomogeneous water flow in hydrodynamic modeling requires a more precise characterization of the vadose zone (Hermans et al., 2023). For that, different authors report application of geophysical methods.

Comte et al., (2019) combined lab data, field observations, ERT and SNMR measurements with petro-physical relationships to characterize the lithology and the hydraulic properties of a micashist aquifer at catchment scale, and build a conceptual model to help parametrize their hydrogeological model. This approach focuses on the aquifer. Flinchum et al., (2019) combined surface and borehole NMR with seismic refraction data to characterize the weathering profile of a granite aquifer critical zone. They distinguished the unsaturated, saturated saprolite and fractured rock with multiscale NMR water content and relaxation time variations and observed the lateral variability by combining the NMR and seismic refraction data. In this paper, we combine field (3D SNMR, ERT and IP) and borehole (BNMR, electrical resistivity and density) geophysical data measured during a same period from late August – beginning of September 2020 into a multiscale joint interpretation. Borehole electrics measured in May 2020, only are not synchronous. The goals are (1) to identify the lithology variations of the heterogeneous limestone (clay, cracks) by a joint interpretation of the whole data. (2) To estimate the water content variations associated to these lithology variations and propose a multiscale water content model of the study site by interpreting the SNMR water content, BNMR water content

and the Archie porosities calculated in the saturated zone with the borehole electrical resistivity data.

For investigating the efficiency of different geophysical methods applied to characterization of the vadose zone we applied the following methods: (1) the electrical properties measured by electrical resistivity tomography (ERT) and induced polarization (IP); and 2) the nuclear magnetic resonance (NMR) methods applied at the different scales (Surface NMR) and (Borehole NMR) (Behroozmand et al. 2015; Legtchenko 2013). Geophysical results are compared with a laboratory study reported by Aldana, (2019) and Aldana et al., (2021).

Materials and methods

The O-ZNS observatory site in the Beauce aquifer (France)

The study site is located in Villamblain, 30 km northwest of Orléans city (France), at the southwest of the Beauce limestone aquifer and in the Loire basin (Figure 1). It is the place of an observatory of the vadose zone: the O-ZNS platform (<https://www.isto-orleans.fr/en/observatories/transfers-unsaturated-zone/>). This observatory is composed of a well with an exceptional size of 4 m diameter and 20 m depth crossing the vadose zone down to the aquifer and is surrounded by eight instrumented scientific boreholes (Abbar et al., 2022).

Previous studies made a first geological characterization of the site by combining log data, lab measurements and surface geophysical studies. In laboratory, Aldana, (2019) and Aldana et al., (2021) described the geology of the site with samples extracted from three boreholes. They characterized a heterogeneous limestone with clay and cracks and measured water content, porosities and densities on core samples. Isch et al., (2022) compared the water content lab

measurements with the water content simulated in a 1D hydrogeological model based on core samples measurements. At the field scale, ERT and IP measurements extended the geology description in 3 boreholes and showed lateral variations including a conductive anomaly interpreted as clay (Abbas et al., 2022; Mallet et al., 2022). The geology of the study site consists of a heterogeneous limestone with three layers: (1) a soil layer with clay (130 – 128 m), (2) a highly heterogeneous limestone (128 – 122 m) and (3) a fractured limestone (122 – 106 m) with 90 % of CaCO₃ (Figure 2). All the elevations are in NGF (French General Leveling).

Poiseaux and Bricy stations provide respectively the GWL (ground water level) and meteorological data (rainfall and ETP) (Figure 1). From 1966 to 2017, the mean effective rainfall (= rainfall – evapotranspiration) calculated during a hydrologic year (from September of the previous year to August of the year) was of 452 mm. The mean GWL was at an elevation of 111 m. The annual recharge is of 110 mm from 1946 to 1994 and there is no run-off (Flipo et al., 2012; Schnebelen et al., 1999).

Geophysical survey

The multimethod and multiscale geophysical survey was done simultaneously in late August-beginning of September 2020 excepting the BER in May 2020, to characterize the site in 3D before the large well was dug. At the date of the study, the water table was at an elevation of 112 m (May) and 111 m (late August - beginning of September). The data measured from surface are 3D SNMR/ERT/IP and in borehole are BNMR, BER and density. The Figure 3 shows the positions of the geophysical acquisitions on the study site.

Surface Nuclear Magnetic Resonance (SNMR)

157

158 The surface nuclear magnetic resonance (SNMR) method measures the water content by using
159 the proton spin magnetic resonance principle. A transmitter loop energizes spin protons by
160 injecting a current pulse with an amplitude I_0 during a delay τ ($q = I_0 \tau$) at the proton resonance
161 (Larmor) frequency, ω_0 in the geomagnetic field B_0 ($\omega_0 = \gamma B_0$ with γ the gyromagnetic
162 ratio). This electromagnetic pulse causes a spin precession and generates a magnetic resonance
163 field $M_{\perp}$. The transmitter loop switches to a receiver connected to the same loop (Tx-Rx) or
164 a separated (Rx) loop and measures a signal proportional to the sum of the precessing magnetic
165 moments with an exponential decay. The two measured parameters are: (1) the initial amplitude
166 of the exponential decay, proportional to the water content, (2) the constant T_2^* of the
167 exponential decay, related to the mean size of water-filled pores and sensitive to the magnetic
168 heterogeneities. Before the signal measurement, there is a delay called the dead time during
169 which the SNMR signal cannot be measured because of the equipment design primarily focused
170 on measurements of relatively long signals corresponding to mobile water (Legchenko et al.,
171 2002; Legchenko and Valla, 2002).

172

173 Consequently, the SNMR does not measure the part of the water content related to relaxation
174 times shorter than the dead time (Flinchum et al., 2019; Müller-Petke et al., 2011). To have
175 more details on the method, see for example (Legtchenko, 2013).

176

177 The 3D SNMR investigation applied on the OZNS experimental site comprises a set of
178 independently measured 1D soundings. After processing each individual data set, these data
179 are combined in a 3D data set. 3-D inversion of these data provide a 3D SNMR water content
180 inverse model (Chevalier et al., 2014; Legchenko et al., 2011).

181

Our data set is composed of ten 1-D soundings using coincident Tx/Rx square loops of 50 m by side with 2 turns of wire, 16 pulses for each sounding from 50 A.ms to 4500 A.ms with 200 to 300 stacks and a dead time value of 40 ms. Figure 3 shows position of these loops. For improving 3-D resolution loops are overlapped. The acquisition was done with the Numis POLY instrument (from IRIS instrument). We processed each sounding independently with the NumPro and SAMOVAR softwares with (1) a notch filtering of the 50 Hz frequencies and harmonics, (2) a 10 Hz bandpass, (3) a stack optimization to improve the signal to noise ratio. The gathered 3-D dataset was inverted with only an optimization of the signal amplitude because of an insufficient signal to noise ratio for inversion of complex signals.. The 3-D inverse model is composed of 10 x 10 x 2 m cells down to a depth of 60 m. The NMR response of the 3-D water-content inversion results fits the data with a RMSE of 16.19 nV. The signal amplitude depends on sounding location and varies between 155 and 280 nV.

Borehole Nuclear Magnetic Resonance (BNMR)

The principle of the BNMR method is similar to the SNMR one but with significant differences. (1) BNMR uses a higher controlled primary field at 8.2 T (instead of the natural geomagnetic field of about 47 μ T at Villamblain) and a consequently higher Larmor frequency of 350 MHz for the equipment used. (2) BNMR uses the CarrPurcell–Meiboom–Gill (CPMG) sequence, that consists of injecting a pulse to provide a 90 ° rotation of the longitudinal magnetization in the transverse plane and then numerous pulses at 180 ° to refocus the signal in many echoes. A “spin echo” NMR signal is observed for each refocusing pulse with a general decay corresponding to the T2 constant instead of the T2* constant usually obtained with SNMR (Behroozmand et al., 2015; Walsh et al., 2013). In BNMR, because of a higher Larmor frequency value and of short delay between the pulses, the dead time is negligible. Consequently, the BNMR measure all the water content and relaxation time values. The BNMR

logs were measured by the NM RSA company with a tool of 60 mm-diameter in the SC05-6-7-8 boreholes. For each depth, the BNMR data consists of a T2 relaxation times distribution with a partial water content for each relaxation time. The T2 relaxation times distribution is cut off at 3 ms and 100 ms to define three types of water content associated to the relaxation time : the clay water content ($T_2 < 3$ ms), the bound water content ($3 \text{ ms} < T_2 < 100 \text{ ms}$) and the moveable water content ($100 \text{ ms} < T_2$). These limits are defined from numerous laboratory experiments to measure the T2 distributions of saturated and unsaturated samples of sandstone and limestone; see for example Dunn et al., (2002). From this T2 distribution, the T2ML value is calculated as the T2 logarithmic mean value of the distribution weighted by the partial water contents e.g. Walsh et al., (2013).

Borehole Electrical Resistivity (BER)

The EM resistivity measurement in borehole consists in measuring the quadrature component of the secondary EM field at a coil distant from a primary field-transmitting coil. The SEMM Logging tool has a diameter of 38 mm and two coil spacings of respectively 510 mm and 810 mm. For each borehole (SC05-6-7-8-9), the data set consists of two resistivity curves in function of depth. Because of borehole effects and a low sensitivity of the tool for high resistivities, the short spacing data are usually noisy and the long spacing ones only are valorized.

Density logging

The gamma-gamma density logging is an active-nuclear measurement applied for determining the formation bulk-densities. The SEMM tool use two detectors that make it possible to correct borehole effects. Thus, compensated gamma-gamma signals respond to variation in electron density which is directly related to the bulk density variation in most subsurface environments (Serra & Serra 2003).

Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Induced Polarization (IP) measurements

The ERT principle is to measure the media electrical resistivity distribution in response to the injection of an electrical current. The measurement consists of injecting an electrical current between two electrodes and to measure the potential between two others electrodes. By increasing the distance between transmitter and receiver we measure media electrical resistivity for increasing volume and depth. The Induced Polarization uses the electrical phenomenon by which the subsoil temporally stores the electrical charges after stopping the injection; the measured parameter is called the chargeability. The difference between both methods is that the ERT measures the voltage in the steady state instead of the IP that measures the voltage decay during the transient state. The data measured by ERT and IP are respectively an apparent electrical resistivity and an apparent chargeability inverted into respectively electrical resistivity and chargeability. For more details about these methods, see for example Singha et al., (2022).

We measured 8 profiles of 48 electrodes with spacings of respectively 2.5 m between the electrodes and 5 m between the profiles. The measurements were done in a 3D dipole-dipole configuration with the Syscal Pro and Syscal Pro Switch instruments (from IRIS Instrument). The pulses have a maximum voltage of 800 V injected during 2 s with a total of 4 measurement cycles. We filtered the data with the softwares Prosys II (IRIS Instrument) and Matlab codes for the IP data. The 3D data inversion was done with the software BERT 3D. The electrical resistivity inverse model has a fitting error of 7 %.

Data analysis

The SNMR and BNMR water content

We attempt to valorize together the SNMR and BNMR water content differences. To date, as knowledge of the authors, there is no simple and general way to use both the BNMR and SNMR data together. The main reasons for that are the different investigated volume, the dead time effect on the SNMR measurements and the differences of Larmor frequencies between BNMR (350 kHz) and SNMR (2 kHz).

As an example, Knight et al., (2012) who had a dead time of 10 ms, after correcting the magnetic heterogeneities component of SNMR $T2^*$, they cut off the BNMR $T2$ distribution at 10 ms and recalculated the BNMR $T2ML$. Then, they found a correlation between the respective corrected $T2^*$ and $T2ML$ values. Müller-Petke et al., (2011) with a dead time value of 40 ms, decided to cut off the BNMR $T2$ distribution at 30 ms and 80 ms, recalculated the BNMR total water content and simplified the vertical profile into a blocky structure. Then they compared these values to the SNMR water content inverted using various filtering and inversion methods. They found that with their best inversion method the inverted SNMR water content has a good correlation with the BNMR water content cut off at 80 ms. Flinchum et al., (2019) generated a SNMR response by forward modelling the BNMR $T2ML$ and water content and inverted this response to obtain a simulated SNMR water content and $T2^*$. The simulated SNMR values show a good agreement with the BNMR values. They are coherent qualitatively with the measured SNMR values, inverted after correcting the magnetic heterogeneities component $T2^*$, with an underestimation of the values by the measured SNMR data. In our case, an attempt to calculate SNMR response and results on the basis of BNMR water content and $T2$ distribution gave reasonable water content values but contrasted $T2ML$ and $T2^*$ values (not presented).

For the present work, we first interpret the total BNMR distribution, then set the cut off for computing the BNMR distribution of the water content at 40 ms. It allows for calculating the total BNMR water content corresponding to $T_2 > 40$ ms, which approximately corresponds to the water content measured with SNMR.

Archie porosity from BER data in the saturated zone

We apply the Archie model proposed by (Abbas, Deparis et al. 2022) at the borehole scale on our site in the context of a heterogeneous limestone. The bulk resistivity ρ is related to the porosity ϕ , and the saturation S_w of the geological formation, taking in account the electrical resistivity of the fluid ρ_f ($\Omega.m$), a and m being empirical parameters related to the tortuosity and cementation, and n , the saturation exponent through the following Archie, (1942) relation.

The fluid resistivity was measured in boreholes with a calibrated sensor. They defined the a and m values (Table 1) using an inversion process using SEMM logging BER measurements in boreholes and water content simulated by Isch et al., (2022) at the date of BER measurement. The n value is fixed at 2.

To be able to use the Archie's law in the Beauce limestone context, they hypothesized that limestone of the OZNS site can be assimilated to a sediment with grain sizes middle to coarse, close to a sand grain sizes. They did the calculation at the depth of the fractured limestone where they assumed that the clay content and the associated surface conduction can practically be neglected. The effectiveness of Archie's law for evaluating an effective porosity requires a homogenous inter-granular porosity and pore-size. The Beauce limestone has a heterogeneous porous network with various connectivity and body size. Müller-Huber et al., (2015) discuss the effect of a variable pore radius on the porosity and on the cementation exponential factor m for limestone samples compared to sand and sandstones samples. They studied two types of

limestone samples: the first ones with vugs and fractures and the second one with an intergranular porosity. Since the m value calculated by Abbas, Deparis et al. (2022) from 111 m to 116 m, is consistent with the values of Müller-Huber et al., (2015) for samples of limestone with vugs and fractures, we consider that we can reasonably use their Archie model for valuing a water content. In the aquifer, the porosity is saturated ($S_w = 1$) and we assume the saturated Archie porosity as equal to the saturated total porosity and that can be compared to the total BNMR water content.

Conceptual porosity model

We discuss the various water content evaluations from different geophysical method with the conceptual porosity model of Lubczynski and Roy, (2005). We adapt this model to our study (Figure 4) to build our multiscale water content model. In the saturated zone, we discuss the BNMR water content and Archie porosity regarding the evaluation of the effective porosity. In the vadose zone, we discuss the respective BNMR and SNMR water content regarding the capillary water. We evaluate and compare the specific yield values to values from literature.

Results and discussion

Lithological variations

Lithological variations at the metric to decametric scale

The Figure 5 shows two horizontal slices of the 3D model at two elevations: 120 m, in the vadose zone and 110 m, in the saturated zone.

At 120 m (vadose zone), the SNMR water content is homogeneous with a water content of 0 - 1 %. On the electrical slices, excepting for the southern and northern boundaries, the global electrical resistivity has a mean value of 250 Ω .m, with an anomaly of 120 - 160 Ω .m in the zone Z2. The global chargeability has a mean value of 1.5 mV/V with an anomaly of mean 2 - 2.6 mV/V in the zone Z2. The electrical resistivity and chargeability anomalies are coherent spatially and define the zone Z2. The zone Z1 has a low water content, a high electrical resistivity and a low chargeability while the zone Z2 has a low water content, a lower electrical resistivity and a higher chargeability than in the zone Z1. We interpret Z1 as a weathered, fractured limestone and Z2 as a more clayey, more weathered, fractured limestone.

At 110 m (saturated zone), the electrical resistivity and the chargeability are homogeneous with average values of respectively 400 Ω .m and 1 mV/V. On the SNMR water content slice, the global water content is of 10 % with two anomalies: the first one in Z2 with a water content of 5 - 8 % and the second one in Z1 with a mean water content of 15 - 22 %. We interpret the SNMR water content variations as porosity variations: Z1 as a karstified/fractured limestone and Z2 as a less porous, less karstified, fractured limestone. This interpretation explains the water content variations. However, this is not coherent with the electrical data because there are no anomalies in the saturated zone where we expect a decrease of resistivity due to the increase of the weathered/fractured porosity.

In order to precise our observations and interpretation, we analyze the data along the NS section (Figure 6) defined in the Figure 5, which crosses the 3D model and some of the boreholes.

In the vadose zone, the 2D electrical resistivity and chargeability sections show (Figure 6):

- A conductive and chargeable upper layer with a resistivity less than 150 $\Omega\cdot\text{m}$ and a chargeability higher than 3 mV/V. This layer shows a significant deepening in Z2 that constitutes the anomaly. BER resistivity imaging confirm this deepening. Extracted electrical resistivity logs (Figure 6.B) precise the depth ranges of the deepening in Z2 mainly from 125 m to 118 m where the values difference of electrical resistivity and chargeability between Z1 and Z2 are better expressed.

- The conductive cover overlay a more resistive (400 $\Omega\cdot\text{m}$) and less chargeable (lower than 1 mV/V) layer, from 125-118 m down to the base of the sections without any visible change when crossing the water level.

The SNMR water content variations, in the vadose zone, show a progressive increase of SNMR water content from 116 m to the saturated zone in Z1 and from 114 m to the saturated zone in Z2 (Figure 6.B). Two effects can explain this increase of water content and may act together: (1) the water content in the capillarity fringe and/or water retention in the vadose zone. (2) The smoothing effect of inversion at the top of the water layer (= mainly the saturated zone).

In the saturated zone, there is a large difference of SNMR water content between both zones, from 15 - 22 % in Z1 to 5 - 8 % in Z2 (Figure 6.A). As previously interpreted, we explain these water content differences as a difference of porosity with a higher fracturing in Z1 than in Z2.

We can interpret the conductive layer as a clayey or weathered limestone with an increase of weathering / clay content in Z2 that explains the deepening of the conductive and chargeable layer. We interpret the resistive layer as a fractured limestone with a higher fracturing in Z1 than in Z2 that explains the SNMR water content variations.

Data Analysis at the borehole scale

The Figure 7 shows the BNMR total water content, the density logs and the BER, as well as the corresponding resistivity log extracted from the 3D model at the respective borehole location.

We identify three layers with various behaviors:

(1) From 130 to 120 m, for all boreholes, we observe an increase of density (from 1.5 to more than 2.0), a high BNMR total water content of 20 – 30 % (130 - 124 m) followed by a decrease to about 12 % (124 - 120 m). For SC06 (Z1), we observe a continuous increase of the BER (50 - 150 Ω .m), for SC09 (Z2), a relatively stable BER about 40 Ω .m (130 - 124 m) followed by a deeper increase up to about 150 Ω .m. This variation is coherent with the conductive anomaly in Z2 previously described in the 3D model and illustrated by SC09 in the Figure 7.A. We attribute the discrepancies between depth limits of BER and 3D ERT to the smoothing effect of inversion.

(2) From 120 m to 112 m, for all boreholes we distinguish a slight BER decrease (160 to 140 Ω .m) from 120 m to 116 m and then a quite constant value of 200-300 Ω .m (116 - 112 m), a quite constant density (mean of 2.2 g.cm-3) and BNMR total water content (mean of 12 %) along the whole horizon.

(3) From 112 m to the borehole base, a progressive increase of BNMR total water content up to a mean value of 26 % in the saturated zone, a rapid decrease of the electrical resistivity down to, in the saturated zone, 100 Ω .m for SC06 and 140 Ω .m for SC09. The density shows a slight decrease to a mean value of 2 g.cm-3 at the top of the saturated zone and then larger variations.

Boreholes SC05-8 characteristics are somewhere close to Z1 characteristics, elsewhere close to Z2 characteristics and thus define an intermediate zone Zi, between Z1 and Z2.

The Figure 8 shows the BNMR data of the boreholes SC06 (Z1) and SC07 (Zi and representative of SC05-7-8) with the BNMR distributed water content, the BNMR T2ML and the SNMR total water content.

In the saturated zone, the borehole SC06 (Z1) has a higher T2ML value (mean of 165 ms, Figure 8.E) than the boreholes SC05-7-8 (Zi) (mean of 35 ms). Similar values for the boreholes SC05-7-8 (Zi) in Figure 8.E justifies that SC07 only is presented as representative of the boreholes SC05-7-8 in Figure 8.D for comparison with SC06 (Figure 8.C). BNMR mobile water is predominant in the SC06 saturated zone (Z1, Figure 8.C) while BNMR bound water is predominant in the SC07 saturated zone (Zi, Figure 8.D).

We interpret the layer 2 in the deep vadose zone as a slightly fractured limestone. The layer is spatially homogeneous from SC06 to SC05-7-8. Making the hypothesis that the layer 3 has the same lithology as the layer 2, the density should increase with the saturation. However, we observe no change in density or a slight decrease. Thus, we infer an increase of porosity associated with an increase of fracturing with depth, below 112 m. This explains both the water content increase associated to an electrical resistivity decrease, while the increase in saturation and porosity plays concurrently for a density almost unchanged.

Spatially, in the saturated zone, we interpret the differences of T2ML, BNMR water content type, BER and density as a difference of porosities and fracturing between Z1 and Zi. Z1 has larger pores interpreted as larger fractures and karstification than Zi with less fractures. This

interpretation is coherent with a lower resistivity in Z1 than in Zi and in Z2. This lower resistivity is however not sensed at the decametric scale.

We explain this incoherence as a lack of vertical resolution of the 3D model at this depth. A simple model based on BER resistivities indeed shows that a low resistivity layer between 112 and 104 m elevation (coherent with the regionally known Gatinais marl) cannot be imaged (Figure 7.B) with the dipole-dipole measurement and inversion schema applied in the present study.

The SNMR water content (Figure 8.A) and BNMR total water content (Figure 8.B) have the same variations but a shift value of mean 12 %. The dead-time effect on SNMR data could explain the water content shift.

Interpretation summary

As a synthesis, the Figure 9 is a lithological model of the site based on the geophysical interpretations at the multi-decametric and borehole scales in comparison to the site lithology as synthesized from Aldana et al., (2021). During the interpretation at both scales, the log were divided into two main parts.

(1) A conductive and chargeable layer with a SNMR water content of 0 % from 130 m to 125 - 120 m interpreted as a clayey weathered limestone, with a deepening in Z2.

(2) From 120 m to 110 m, the geophysical interpretation of the 3D SNMR water content and electrical resistivity shows a resistive layer with a higher water content in Z1 than in Zi and Z2 in the saturated zone. We first interpret this layer as a fractured limestone, with a higher

fracturing area in Z1 than in Z2 in the saturated zone. The geophysical interpretation of the borehole data allows us to precise the lithological interpretation with a slightly fractured limestone from 120 m to 112 m and a fractured limestone from 112 m to 110 m, with a karstification in Z1.

The water content measurements

Comparison of the BNMR water content and the Archie porosity in the saturated fractured limestone at the borehole scale

The Table 2 presents the mean BNMR total water content calculated in the saturated zone for the borehole SC06 (Z1) and the boreholes SC05-7-8 (Zi). The mean BER data evaluated for the same depth range are also presented as well as the Archie porosities calculated using the Archie's m developed by Abbas et al., (2022).

We observe the BNMR total water content values and the BER water content (= BER porosity for full saturation) are close to each other. The difference of 2 to 4 %, if significant, might be explained by the non-connected porosity that contribute to the NMR water content but does not contribute to BER.

Comparison of the SNMR and BNMR water content

Figure 8.A and 8.B showed that the SNMR and the BNMR water content have similar vertical variations but with an average shift of +12 % between them. Moreover, lateral variations in the saturated zone are evidenced in SNMR by an increase of the total water content from Zi to Z1 values and in BNMR by an increase of the free water content from Zi to Z1.

The Figure 10 summarizes these observations and shows the BNMR water content distribution, the summed BNMR water content for T2 lower than 40 ms (the SNMR dead time) (red curves) for the boreholes SC06 (Figure 10.A) and SC05-7-8 (Figure 10.B). The Figure 10.C shows the BNMR total water content (point), the BNMR total water content summed for the T2 values greater than 40 ms, and the SNMR total water content. Although we do not consider SNMR and BNMR water content values are directly comparable, their similarity of shape tell us they describe the same phenomena and we attempt to valorize them together for building our water content model of the Beauce limestone.

In the vadose zone, we observe a BNMR water content greater than 40 ms decay from 111 m to 113 m and variations with values smaller than 5 % above 113 m. This decay above the water table, attributed to the capillarity fringe is 1.5 m-thick, the same thickness than the capillarity fringe of the simulated water content based on lab measurements in Aldana et al., (2021). The variations above are coherent with retention water in the vadose zone (Isch et al., 2022). We also observe a good agreement with the SNMR total water content variations in the vadose zone: a smooth decay above the water table and water content variations with values smaller than 5 % above. In the upper part, we note that the maximum SNMR & BNMR water content correspond to the upper altered layer (L1, Figure 9) where lithology changes with higher clay content and possibly massive limestone at its base (Figure 2) may favor some perched aquifer or a relatively higher retention water content. We attribute the smoother SNMR water content decay above the water level both to the inversion and to the capillarity fringe.

Legchenko et al., (2022) applied a SNMR water content monitoring during one hydrologic year on a site 1.5 km to the south of the OZNS observatory to study the vadose zone dynamic. Their results showed that during the infiltration process, the SNMR water column increases of about 200 mm to compare with a corresponding increase of the cumulated effective rainfall of about

600 mm. This water column accumulation occurs 3-month before the water table rise, during the recharge process.

Our SNMR and BNMR data were measured in September 2020 before the hydrogeological recharge. Let us estimate the effect of an increase of the water column during the recharge. In the Figure 10.C, the BNMR water content larger than 40 ms is of mean 6 % from 111 m to 113 m and of mean 2 % from 113 m to 120 m in the fractured limestone. Considering a water column increase of 210 mm, we obtain an increase of 3 % of water content from 113 m to 120 m in the vadose zone. The water column increase value of 210 mm is close to the (Legchenko et al., 2022) results based on SNMR during the 1999-2000 recharge monitoring. The consequent water content value in the vadose zone is coherent with the BNMR data measured.

In the aquifer, for the boreholes SC05-7-8, the BNMR water content larger than 40 ms represents half of the BNMR total water content and the value is close to the SNMR water content with a mean water content of 12 %. For the borehole SC06, the BNMR water content larger than 40 ms represents a larger part of the total water content with a value of 25 % instead of the SNMR water content that is only 16 %. To explain the difference between the SNMR water content and the BNMR water content larger than 40 ms, we estimate the effect of a saturated karst of a given volume on the total water content value regarding the volume explored. At the borehole scale, we interpret the difference between the boreholes SC05-7-8 and SC06 as karst in SC06. Regarding the volume (assumed as a 3 m - cylinder with a rayon of 11.5 cm), the difference between a water content of 12 % (SC05-7-8) and of 25 % (SC06) represents the volume of a sphere with a rayon of 15 cm that is coherent with some karst conduit observed during the well digging. At the decametric scale, regarding the volume, assumed as a square with 50 m by side (size of the SNMR loop) and a 3 m thickness, the difference between a water content of 12 % (SC05-7-8, volume of 900 m³) and of 15 % (SC06, volume of 1125

m³) represents a volume of 225 m³. That is to say a network of horizontal karst conduit of 0.1 m diameter and of 50 m long every 2.7 x 2.7 m. This is quite a lot but not unrealistic. Water filled karstic cavities thus explain the more or less varying water content measured at the decametric as well as the metric scale.

We then schematically propose an evolution of the vadose zone water content during a high recharge like the 1999-2000' one and a few month before aquifer rise. We propose that this model may be used in order to preliminary simulate of geophysical responses during a recharge event. It would then be a base for further improvement through monitoring approach.

The Figure 11 synthetizes the results and proposes a conceptual model of water content and porosity based on the BNMR water content larger than 40 ms of SC05-7-8 in Zi. In this model, the specific yield value of 10 % is coherent with the range of the literature values for the Beauce limestone (Schnebelen et al., 1999). More or less important water content discrepancies from this model at the aquifer top are explained by karstic cavities of decimeter size corresponding to karst observed during the well digging. This model is compatible with the preceding estimation of the water column variation in the vadose zone during the hydrogeological recharge of 1999-2000 presented by Legchenko et al., (2020). A corresponding water column increase in the vadose zone is schematically illustrated Figure 11.

Conclusion and outlooks

A multimethod and multiscale geophysical investigation was applied on the OZNS observatory in order to determine geological and associated water content heterogeneities that may affect water flow in the vadose zone.

The multiscale geological interpretation of 3D surface and borehole geophysics shows at least three combinations of different lithological variations that may affect the hydrogeological phenomenon within the vadose zone and the underlying saturated zone: weathering, clay content, fracturing and karstification. At a multi-decametric scale, the joint interpretation of the 3D surface nuclear magnetic resonance, electrical resistivity tomography and induced polarization models is firstly able to identify zones with limestone variations including clay, fractures or karstification. The deepening of a clayey, surficial horizon define an anomaly area attributed to increased weathering within a less weathered limestone. The borehole nuclear magnetic resonance and electrical resistivity data makes it possible to precise the distribution of the interpreted fractured/karstified formation in the lower saturated and unsaturated fractured limestone, depths where the 3D models are in a resolution limit.

In the saturated zone, borehole NMR water content and Archie porosity, calculated from the borehole electrical resistivity data, show close values of about 20 % that are taken as reasonable estimation of the effective porosity of the fractured limestone.

Although borehole and surface NMR data appear not directly comparable, their joint valorization make it possible to propose a preliminary, schematic model of the water content of the lower part of fractured Beauce limestone. This model is compatible with the known regionally specific yield values and with a preceding estimation of the water column variation in the vadose zone during a hydrogeological recharge event based on surface nuclear magnetic resonance measurement. More or less contrasted water content are observed at top of the saturated zone depending on the measurement scale and the location. This model easily explains the observed difference by introducing water-filled karst network of decimetric size in agreement with the karstified limestone area defined at decametric scale from the surface and borehole measurements.

596

597 Our water content model thus appears as a robust schematic model that could be used for
598 simulating geophysical responses to a recharge event. As an outlook of the present work, a
599 multimethod monitoring including SNMR, BNMR and BER measurements is recommended in
600 order to improve the vadose zone dynamic characterization initiated by previous works.

601

602 References

- 603 Abbas, M., Deparis, J., Isch, A., Mallet, C., Jodry, C., Azaroual, M., Abbar, B., Baltassat, J.M.,
604 2022. Hydrogeophysical characterization and determination of petrophysical
605 parameters by integrating geophysical and hydrogeological data at the limestone vadose
606 zone of the Beauce aquifer. *Journal of Hydrology* 615, 128725.
607 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128725>
- 608 Abbas, M., Jodry, C., Mallet, C., Azaroual, M., 2021. CARACTERISATION DE
609 L'HETEROGENEITE DE LA ZONE NON-SATUREE A L'ENDROIT DE
610 L'OBSERVATOIRE O-ZNS PAR UNE APPROCHE HYDROGEOPHYSIQUE
611 MULTI-METHODES. Presented at the GEOFCAN.
- 612 AELB, 2019. Etat des lieux du bassin Loire-Bretagne - 12/12/2019 - Données et documents -
613 Agence de l'eau Loire-bretagne [WWW Document]. URL [https://donnees-](https://donnees-documents.eau-loire-bretagne.fr/home/documents/etat-des-lieux/etat-des-lieux-du-bassin-loire-bretagne---12122019.html)
614 [documents.eau-loire-bretagne.fr/home/documents/etat-des-lieux/etat-des-lieux-du-](https://donnees-documents.eau-loire-bretagne.fr/home/documents/etat-des-lieux/etat-des-lieux-du-bassin-loire-bretagne---12122019.html)
615 [bassin-loire-bretagne---12122019.html](https://donnees-documents.eau-loire-bretagne.fr/home/documents/etat-des-lieux/etat-des-lieux-du-bassin-loire-bretagne---12122019.html) (accessed 5.22.24).
- 616 Aldana, C., 2019. Etude des propriétés de transfert de la zone non saturée : application
617 aux calcaires aquitaniens de l'aquifère de Beauce (Thèse de doctorat). Université
618 d'Orléans.
- 619 Aldana, C., Isch, A., Bruand, A., Azaroual, M., Coquet, Y., 2021. Relationship between
620 hydraulic properties and material features in a heterogeneous vadose zone of a
621 vulnerable limestone aquifer. *Vadose Zone Journal* 20, e20127.
622 <https://doi.org/10.1002/vzj2.20127>
- 623 Archie, G.E., 1942. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir
624 Characteristics. *Transactions of the AIME* 146, 54–62. [https://doi.org/10.2118/942054-](https://doi.org/10.2118/942054-G)
625 [G](https://doi.org/10.2118/942054-G)
- 626 Baltassat, J.-M., Deparis, J., Gaudot, I., Jacob, T., Kessouri, P., Ammor, S., Bitri, A., 2025.
627 Caractérisation géophysique du site de l'Observatoire O-ZNS de Villamblain (45) (No.
628 RP-72842-FR). BRGM.
- 629 Behroozmand, A.A., Keating, K., Auken, E., 2015. A Review of the Principles and Applications
630 of the NMR Technique for Near-Surface Characterization. *Surv Geophys* 36, 27–85.
631 <https://doi.org/10.1007/s10712-014-9304-0>
- 632 Binley, A., Hubbard, S.S., Huisman, J.A., Revil, A., Robinson, D.A., Singha, K., Slater, L.D.,
633 2015. The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface
634 processes over multiple scales. *Water Resources Research* 51, 3837–3866.
635 <https://doi.org/10.1002/2015WR017016>
- 636 Bonnet, M., Floriat, S., 2004. Reprise du modèle de gestion de la nappe de Beauce. PHASE 1
637 - Calage en régime permanent et transitoire (No. RPP04M026b). Hydroexpert.
- 638 Castany, G., 1998. Hydrogéologie : principes et méthodes. Dunod, Paris.

- Commisariat général au développement durable, 2013. Le point sur : Les teneurs en nitrates augmentent dans les nappes phréatiques jusqu'en 2004 puis se stabilisent mais de fortes disparités régionales existent. Observation et statistiques. 4.
- Comte, J.-C., Ofterdinger, U., Legchenko, A., Caulfield, J., Cassidy, R., Mézquita González, J.A., 2019. Catchment-scale heterogeneity of flow and storage properties in a weathered/fractured hard rock aquifer from resistivity and magnetic resonance surveys: implications for groundwater flow paths and the distribution of residence times. Geological Society, London, Special Publications 479, 35–58. <https://doi.org/10.1144/SP479.11>
- Covington, M.D., Martin, J.B., Toran, L.E., Macalady, J.L., Sekhon, N., Sullivan, P.L., García Jr., Á.A., Heffernan, J.B., Graham, W.D., 2023. Carbonates in the Critical Zone. *Earth's Future* 11, e2022EF002765. <https://doi.org/10.1029/2022EF002765>
- Darcy, H., 1856. Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau. Victor Dalmont.
- de Frutos Cachorro, J., Erdlenbruch, K., Tidball, M., 2017. A dynamic model of irrigation and land-use choice: application to the Beauce aquifer in France. *European Review of Agricultural Economics* 44, 99–120. <https://doi.org/10.1093/erae/jbw005>
- Dunn, K.-J., Bergman, D.J., LaTorraca, G.A., 2002. Nuclear Magnetic Resonance: Petrophysical and Logging Applications. Elsevier.
- Durner, W., 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research* 30, 211–223. <https://doi.org/10.1029/93WR02676>
- Flinchum, B.A., Holbrook, W.S., Parsekian, A.D., Carr, B.J., 2019. Characterizing the Critical Zone Using Borehole and Surface Nuclear Magnetic Resonance. *Vadose Zone Journal* 18, 180209. <https://doi.org/10.2136/vzj2018.12.0209>
- Flipo, N., Monteil, C., Poulin, M., de Fouquet, C., Krimissa, M., 2012. Hybrid fitting of a hydrosystem model: Long-term insight into the Beauce aquifer functioning (France). *Water Resources Research* 48, 21. <https://doi.org/10.1029/2011WR011092>
- Hermans, T., Goderniaux, P., Jougnot, D., Fleckenstein, J.H., Brunner, P., Nguyen, F., Linde, N., Huisman, J.A., Bour, O., Lopez Alvis, J., Hoffmann, R., Palacios, A., Cooke, A.-K., Pardo-Álvarez, Á., Blazeovic, L., Pouladi, B., Haruzi, P., Fernandez Visentini, A., Nogueira, G.E.H., Tirado-Conde, J., Looms, M.C., Kenshlikova, M., Davy, P., Le Borgne, T., 2023. Advancing measurements and representations of subsurface heterogeneity and dynamic processes: towards 4D hydrogeology. *Hydrology and Earth System Sciences* 27, 255–287. <https://doi.org/10.5194/hess-27-255-2023>
- Isch, A., Coquet, Y., Abbar, B., Aldana, C., Abbas, M., Bruand, A., Azaroual, M., 2022. A comprehensive experimental and numerical analysis of water flow and travel time in a highly heterogeneous vadose zone. *Journal of Hydrology* 610, 127875. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127875>
- 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. Presented at the GEOFCAN 2018, Antony, France.
- Knight, R., Grunewald, E., Irons, T., Dlubac, K., Song, Y., Bachman, H.N., Grau, B., Walsh, D., Abraham, J.D., Cannia, J., 2012. Field experiment provides ground truth for surface nuclear magnetic resonance measurement. *Geophysical Research Letters* 39. <https://doi.org/10.1029/2011GL050167>
- Kosugi, K., 1994. Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention. *Water Resources Research* 30, 891–901. <https://doi.org/10.1029/93WR02931>
- Legchenko, A., 2021. Surface NMR for Hydrogeology: A user's guide. IOP Publishing.
- Legchenko, A., Baltassat, J.-M., Abbas, M., Isch, A., Amraoui, N., Azaroual, M., Deparis, J., Ryckebusch, C., Kessouri, P., 2022. Monitoring unsaturated water flow using magnetic

- resonance soundings. *Journal of Hydrology* 612, 128318.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128318>
- Legchenko, A., Baltassat, J.-M., Duwig, C., Boucher, M., Girard, J.-F., Soruco, A., Beauce, A., Mathieu, F., Legout, C., Descloitres, M., Gabriela Patricia, F.A., 2020. Time-lapse magnetic resonance sounding measurements for numerical modeling of water flow in variably saturated media. *Journal of Applied Geophysics* 175, 103984.
<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.103984>
- Legchenko, A., Comte, J.-C., Ofterdinger, U., Vouillamoz, J.-M., Lawson, F.M.A., Walsh, J., 2017. Joint use of singular value decomposition and Monte-Carlo simulation for estimating uncertainty in surface NMR inversion. *Journal of Applied Geophysics* 144, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.06.010>
- Legchenko, A., Descloitres, M., Vincent, C., Guyard, H., Garambois, S., Chalikakis, K., Ezersky, M., 2011. Three-dimensional magnetic resonance imaging for groundwater. *New J. Phys.* 13, 025022. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/13/2/025022>
- Legchenko, A., Valla, P., 2003. Removal of power-line harmonics from proton magnetic resonance measurements. *Journal of Applied Geophysics* 53, 103–120.
[https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(03\)00041-7](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(03)00041-7)
- Legchenko, A., Valla, P., 2002. A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements. *Journal of Applied Geophysics, Surface Nuclear Magnetic Resonance: What is Possible?* 50, 3–19. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00127-1](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00127-1)
- Legtchenko, A., 2013. *Magnetic Resonance Imaging for Groundwater*. John Wiley & Sons.
- Lesparre, N., Girard, J.-F., Jeannot, B., Weill, S., Dumont, M., Boucher, M., Viville, D., Pierret, M.-C., Legchenko, A., Delay, F., 2020. Magnetic resonance sounding measurements as posterior information to condition hydrological model parameters: Application to a hard-rock headwater catchment. *Journal of Hydrology* 587, 124941.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124941>
- Lubczynski, M., Roy, J., 2005. MRS contribution to hydrogeological system parametrization. *Near Surface Geophysics* 3, 131–139. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005009>
- 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.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105050>
- Mallet, Céline, Jodry, C., Isch, A., Laurent, G., Deparis, J., Azaroual, M., 2022. Multi-geophysical Field Measurements to Characterize Lithological and Hydraulic Properties of a Multi-scale Karstic and Fractured Limestone Vadose Zone: Beauce Aquifer (O-ZNS), in: Di Mauro, A., Scozzari, A., Soldovieri, F. (Eds.), *Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management*, Springer Water. Springer International Publishing, Cham, pp. 461–484. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7_19
- Martin, J.C., 2000. Etudes préalables à la réalisation d'un modèle de gestion de la nappe de Beauce. Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère. Mesure de la transmissivité et du coefficient d'emménagement (No. BRGM/RP-50348-FR). BRGM.
- Martin, J.C., Giot, D., Le Nindre, Y.M., 1999. Etudes préalables à la réalisation d'un modèle de gestion de la nappe de Beauce. Géométrie du réservoir et limites de la nappe de Beauce (No. R 40571). BRGM.
- Mazzilli, N., Boucher, M., Chalikakis, K., Legchenko, A., Jourde, H., Champollion, C., 2016. Contribution of magnetic resonance soundings for characterizing water storage in the unsaturated zone of karst aquifers. *GEOPHYSICS* 81, WB49–WB61.
<https://doi.org/10.1190/geo2015-0411.1>

- Mazzilli, N., Chalikakis, K., Carrière, S., Legchenko, A., 2020. Surface Nuclear Magnetic Resonance Monitoring Reveals Karst Unsaturated Zone Recharge Dynamics during a Rain Event. *Water* 12. <https://doi.org/10.3390/w12113183>
- Monteil, C., 2011. Estimation de la contribution des principaux aquifères du bassin versant de la Loire au fonctionnement hydrologique du fleuve à l'étiage. Ecole Nationales des Mines de Paris.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12, 513–522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- Müller-Huber, E., Schön, J., Börner, F., 2015. The effect of a variable pore radius on formation resistivity factor. *Journal of Applied Geophysics* 116, 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.03.011>
- Müller-Petke, M., Hiller, T., Herrmann, R., Yaramanci, U., 2011. Reliability and limitations of surface NMR assessed by comparison to borehole NMR. *Near Surface Geophysics* 9, 123–134. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2010066>
- Ould Mohamed, S.-A., 1995. Etude du fonctionnement hydrique hivernal d'un sol limono-argileux de Petite Beauce : Application d'un modèle d'infiltration et incidence sur la lixiviation du nitrate. Orléans.
- Richards, L.A., 1931. CAPILLARY CONDUCTION OF LIQUIDS THROUGH POROUS MEDIUMS. *Physics* 1, 318–333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>
- Ryckebusch, C., Baltassat, J.-M., Abbar, B., Abbas, M., Ardito, L., Legchenko, A., Azaroual, M., Kessouri, P., 2025. Installation de boucles RMP décimétriques dans le puits de la plateforme PIVOTS O-ZNS à Villamblain (45) (No. RP-7168-FR). BRGM.
- SAGE, 2013a. Documents constitutifs du SAGE - Synthèse de l'état des lieux. Sage. URL <https://www.sage-beauce.fr/documents-constitutifs-du-sage/> (accessed 5.22.24).
- SAGE, 2013b. Documents constitutifs du SAGE - Rapport de présentation. Sage. URL <https://www.sage-beauce.fr/documents-constitutifs-du-sage/> (accessed 5.22.24).
- Schnebelen, N., 2000. Analyse et modélisation de l'impact de la maîtrise des pratiques agricoles sur la pollution diffuse par les nitrates : application à l'aquifère des Calcaires de Beauce, site de Villamblain (These de doctorat). Orléans.
- Schnebelen, N., Ledoux, E., Bruand, A., Creuzot, G., 1999. Stratification hydrogéochimique et écoulements verticaux dans l'aquifère des calcaires de Beauce (France): Un système anthropisé à forte variabilité spatiale et temporelle. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* 329, 421–428. [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(00\)80066-X](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(00)80066-X)
- Seguin, J.-J., 2016. Analyse de quinze séries piézométriques de la nappe des Calcaires de Beauce. (No. RP-65964-FR). BRGM.
- Serra, O., Serra, L., 2003. Well logging and geology.
- Singha, K., Johnson, T.C., Day-Lewis, F.D., Slater, L.D., 2022. Electrical Imaging for Hydrogeology. *The Groundwater Project*.
- Spellman, P., Breithaupt, C., Bremner, P., Gulley, J., Jenson, J., Lander, M., 2022. Analyzing Recharge Dynamics and Storage in a Thick, Karstic Vadose Zone. *Water Resources Research* 58, e2021WR031704. <https://doi.org/10.1029/2021WR031704>
- Sullivan, P.L., Zhang, C., Behm, M., Zhang, F., Macpherson, G.L., 2020. Toward a new conceptual model for groundwater flow in merokarst systems: Insights from multiple geophysical approaches. *Hydrological Processes* 34, 4697–4711. <https://doi.org/10.1002/hyp.13898>
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- Thiery, D., 2014. Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d'utilisation. Rapport final (No. BRGM/RP-62797-FR). BRGM.

van Genuchten, M.Th., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Science Society of America Journal 44, 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

Vouillamoz, J.-M., 2003. La caractérisation des aquifères par une méthode non invasive : les sondages par résonance magnétique protonique (These de doctorat). Paris 11.

Tables

Elevation	a	m	n	$\rho_f (\Omega.m)$
111-116 m	0.6	1.47	2	20

Table 1: Archie's law parameters for the limestone of the OZNS site calculated by (Abbas et al., 2022)

		<i>BNMR total water content</i>	<i>BER ($\Omega.m$)</i>	<i>BER porosity (Archie)</i>
Aquifer	SC06 – Z1	25%	100 $\Omega.m$	23%
	SC05-7-8 – Zi	25%	120 $\Omega.m$	21%

Table 2 : BNMR total water content compared to the Archie porosity calculated from BER and Archie's law in the saturated fractured limestone.

Figures

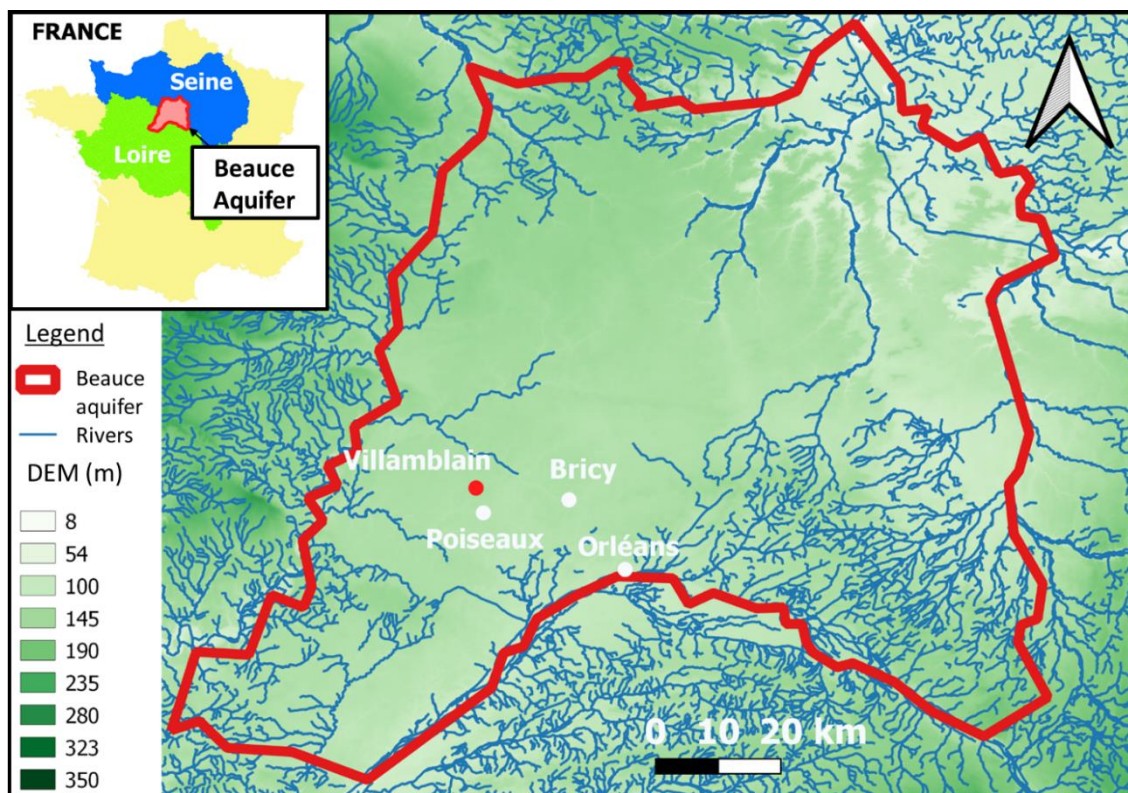


Figure 1 : Localization of the study site in Villamblain, near Orléans (France), within the Beauce aquifer. Poiseaux and Bricy stations provide respectively GWL and meteorological data. DEM = digital elevation model.

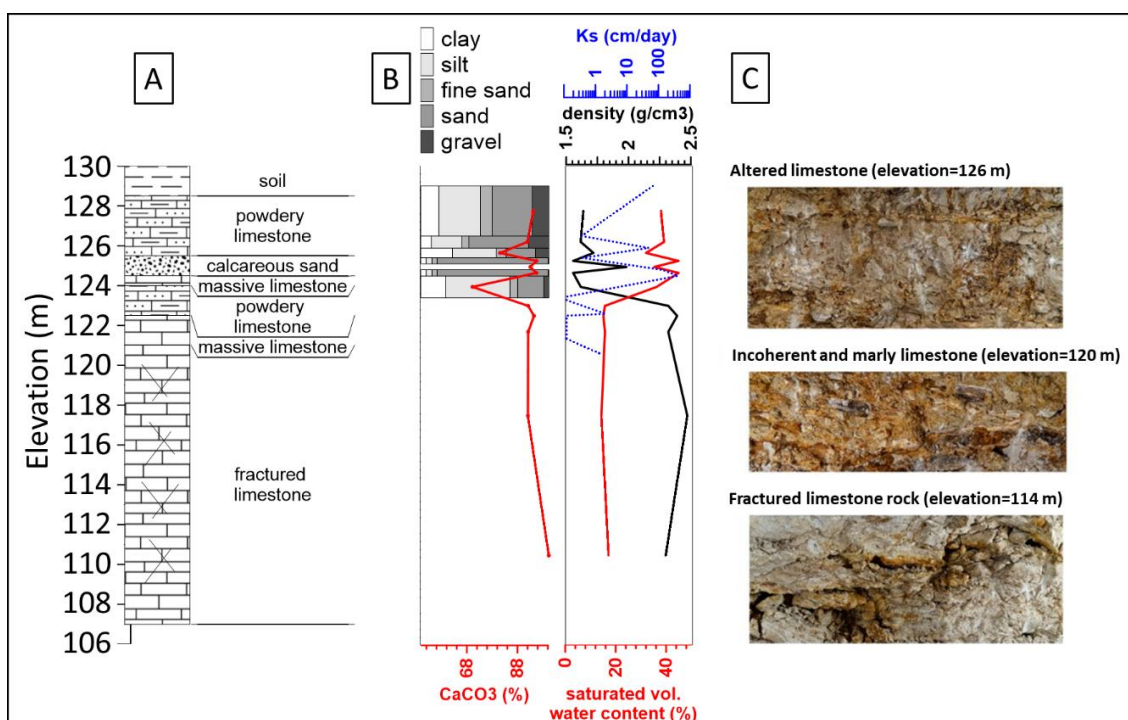


Figure 2 : Summary of the boreholes (SC1, SC2, SC3) geology (A), granulometry (B) and other characteristics from lab measurements (C) of the experimental site (Aldana et al., 2021).

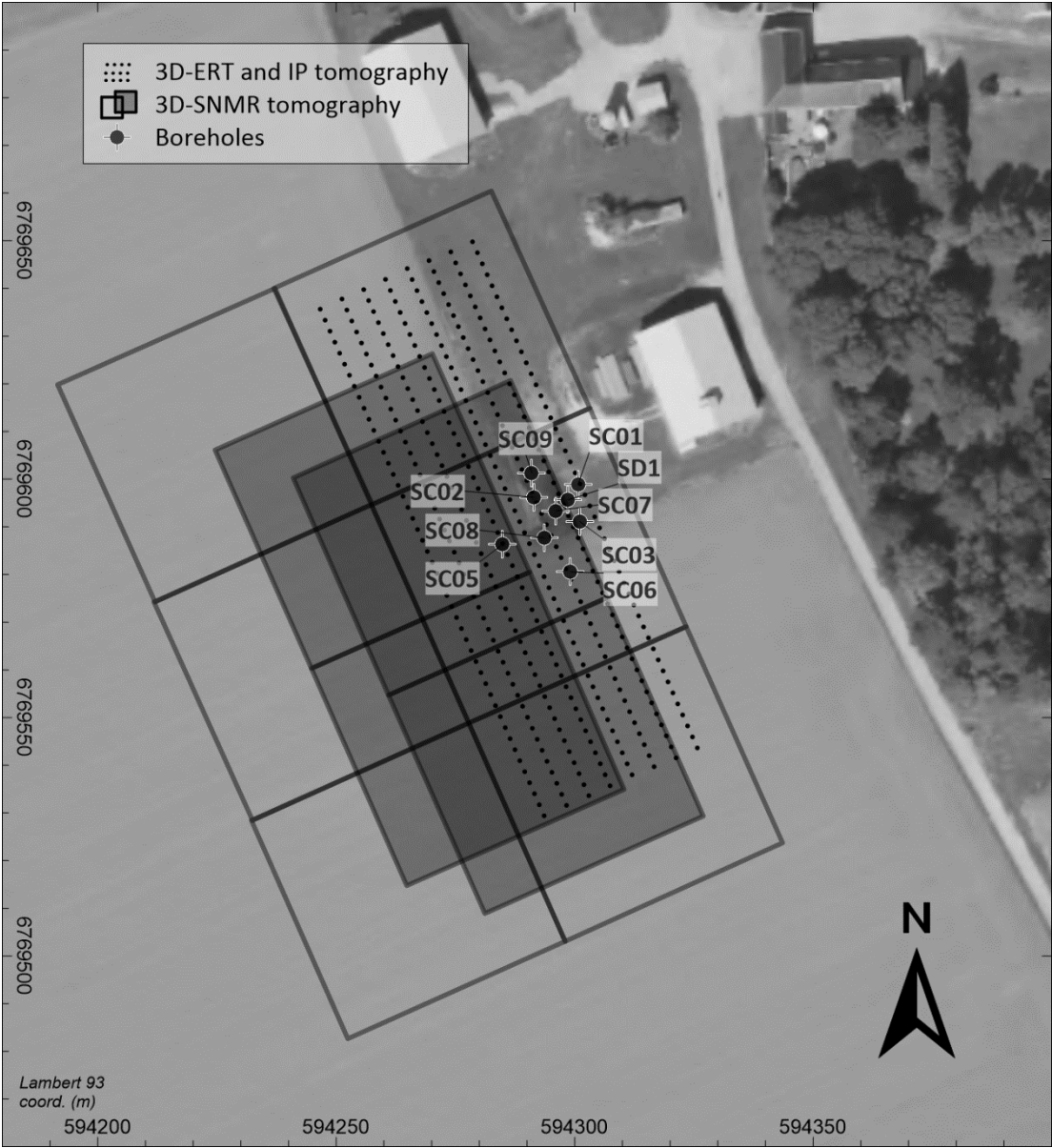


Figure 3 : Localization of the geophysical measurements on the investigated area. The data measured in some of the boreholes are borehole-NMR, borehole electrical resistivity and density data.

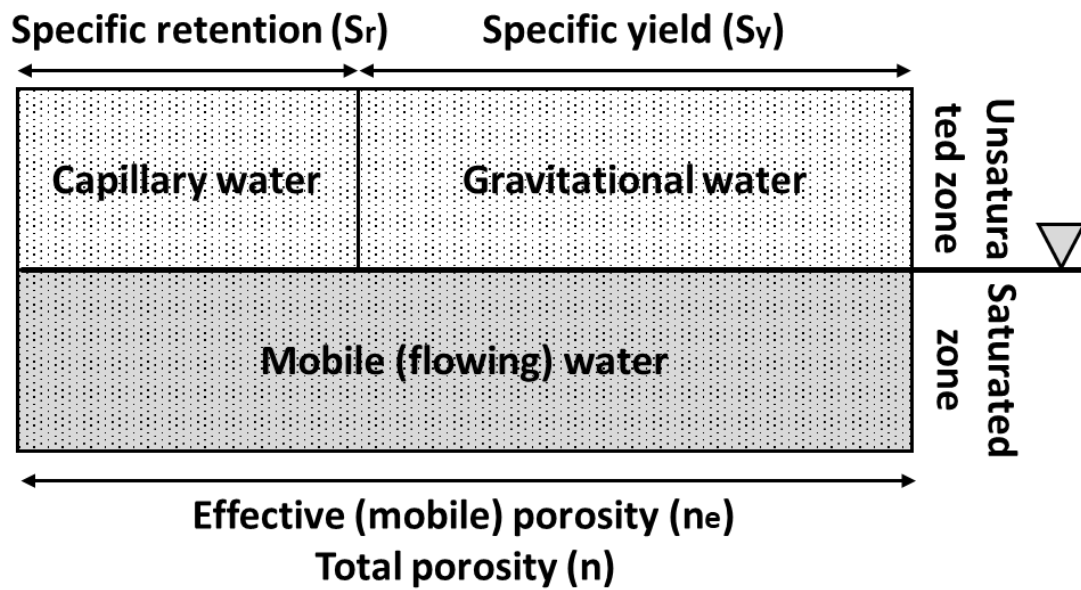


Figure 4 : Conceptual model of porosity modified after Lubczynski and Roy, (2005) in the unsaturated and saturated zones.

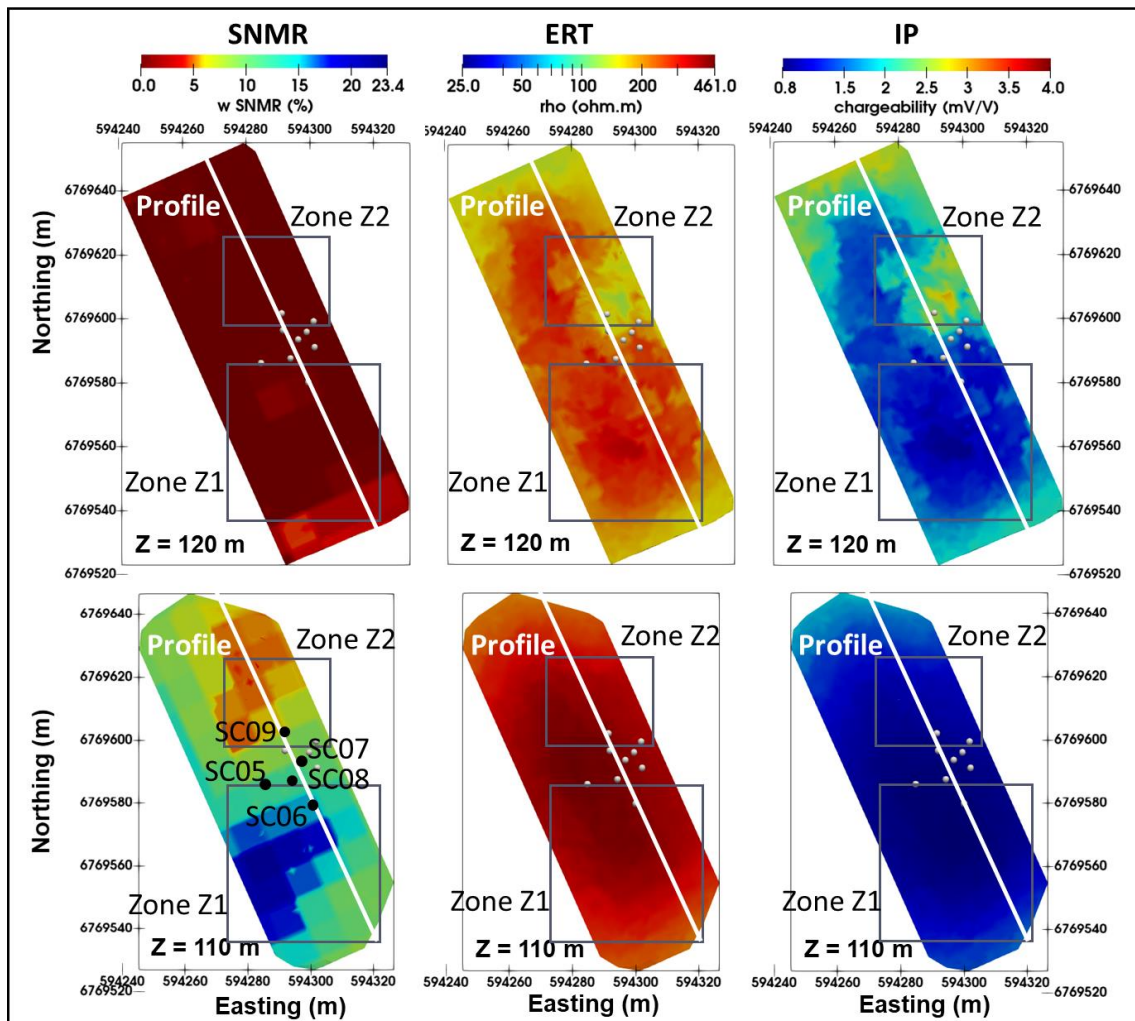


Figure 5 : Horizontal slices of the 3D model in the vadose zone (top, $Z = 120$ m) and in the aquifer (bottom, $Z = 110$ m). The parameters are the SNMR water content (left), the electrical resistivity (center) and the chargeability (right). The white dots are the boreholes. The gray squares show the zones 1 and 2 with anomalies. The valorized boreholes SC05-6-7-8-9 (black dots) are located on the SNMR horizontal slice ($Z = 110$ m).

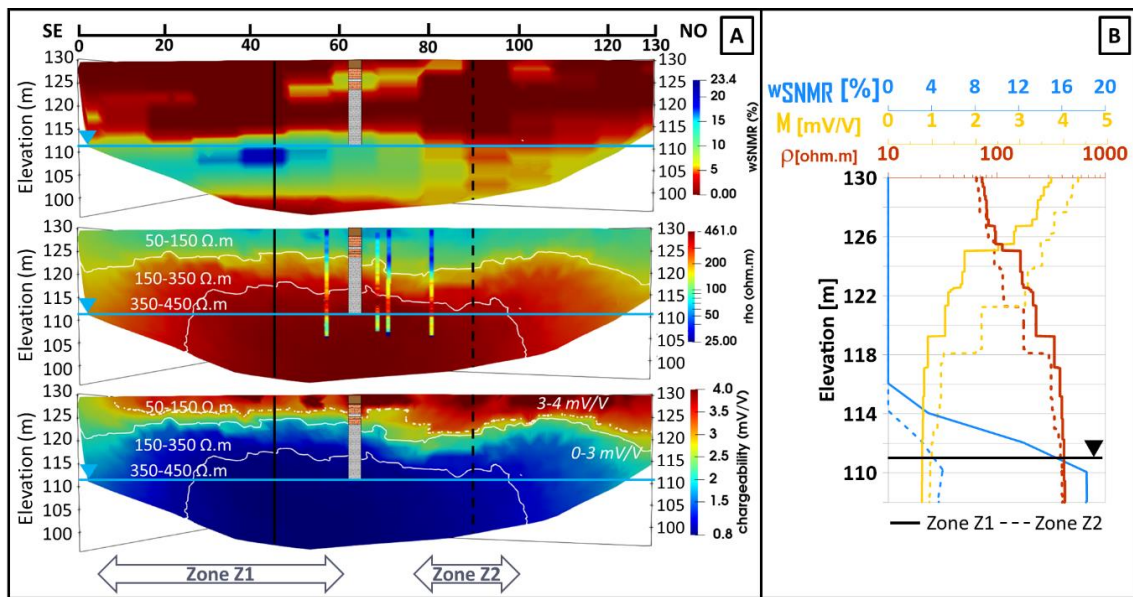


Figure 6 : (A) SNMR water content vertical section (top), electrical resistivity vertical section with electrical conductivity logs from boreholes (left to right : SC06-SC05-SC07-SC09) (center), chargeability vertical section (bottom), extracted from the 3D model. The blue line is the water table. The vertical black line and black dash line are the positions of the 1D logs extracted from the 3D model in each zone. The white lines are the electrical resistivity isolines at 150 Ω .m and 350 Ω .m. The dash white line is the chargeability isoline at 3 mV/V. (B) 1D logs extracted from the 2D profiles: solid lines for the zone 1 and dash lines for the zone 2. The black line is the water table.

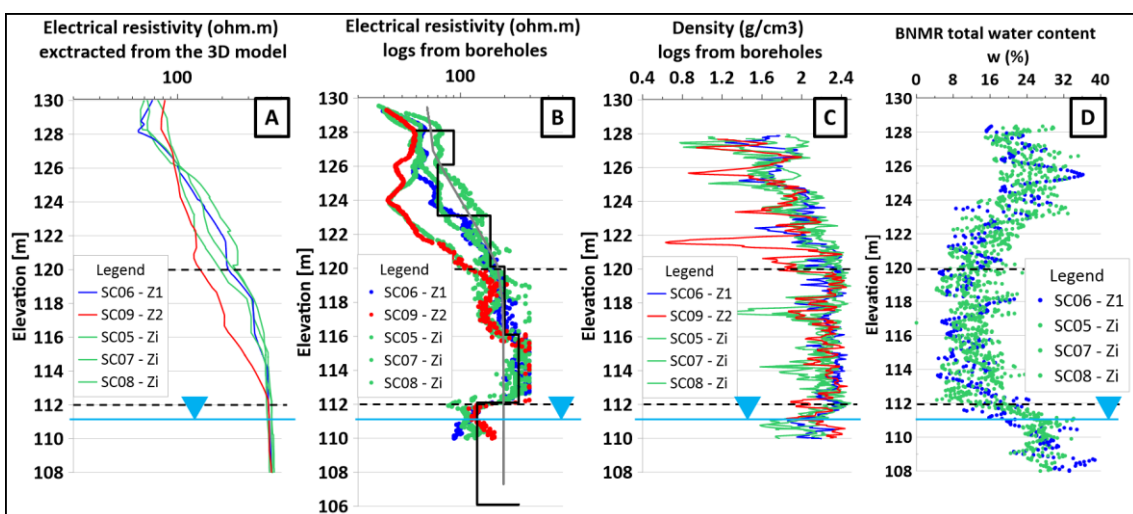


Figure 7 : Electrical resistivity extracted from the 3D model at the position of the boreholes SC05-6-7-8-9. (B) Electrical resistivity logs of boreholes SC05-6-7-8-9; the resistivities higher than 300 $\Omega.m$ are out of the sensitivity range of the tool and are not presented. The black line is a synthetic model based on the borehole data and the gray line is the ERT inversion result of this model. (C) Density logs of boreholes SC05-6-7-8-9. (D) BNMR total water content logs of boreholes SC05-6-7-8. The blue dash line is the water table. The black dash lines are the limits position of the interpreted layers.

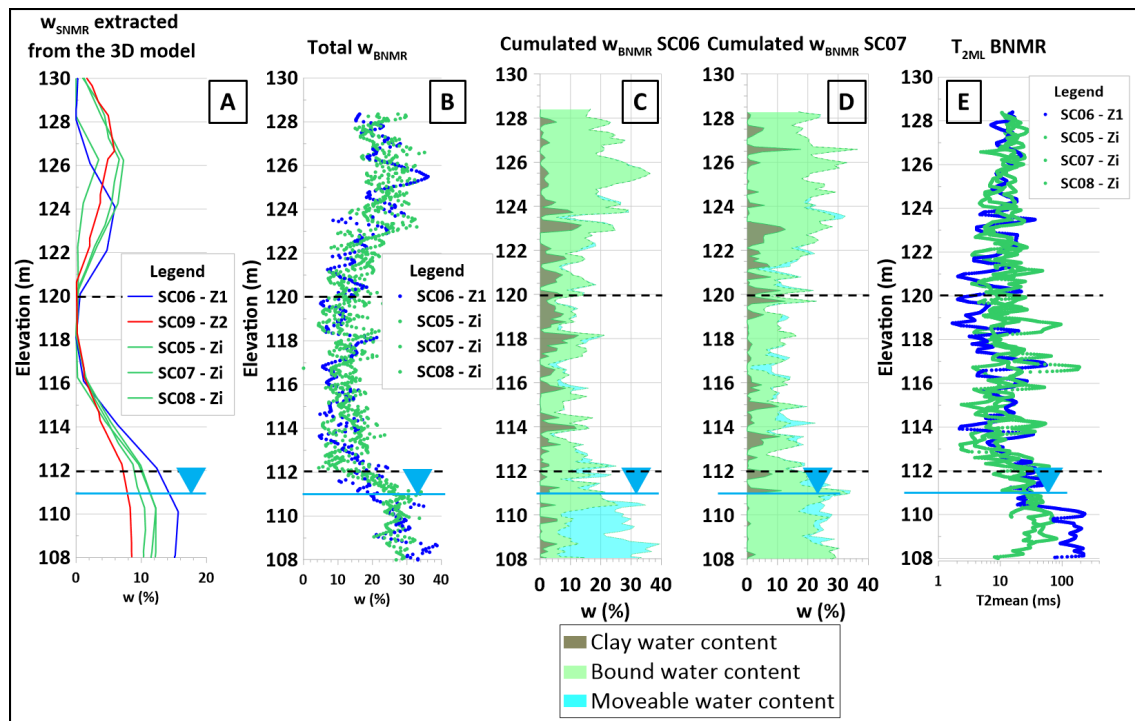
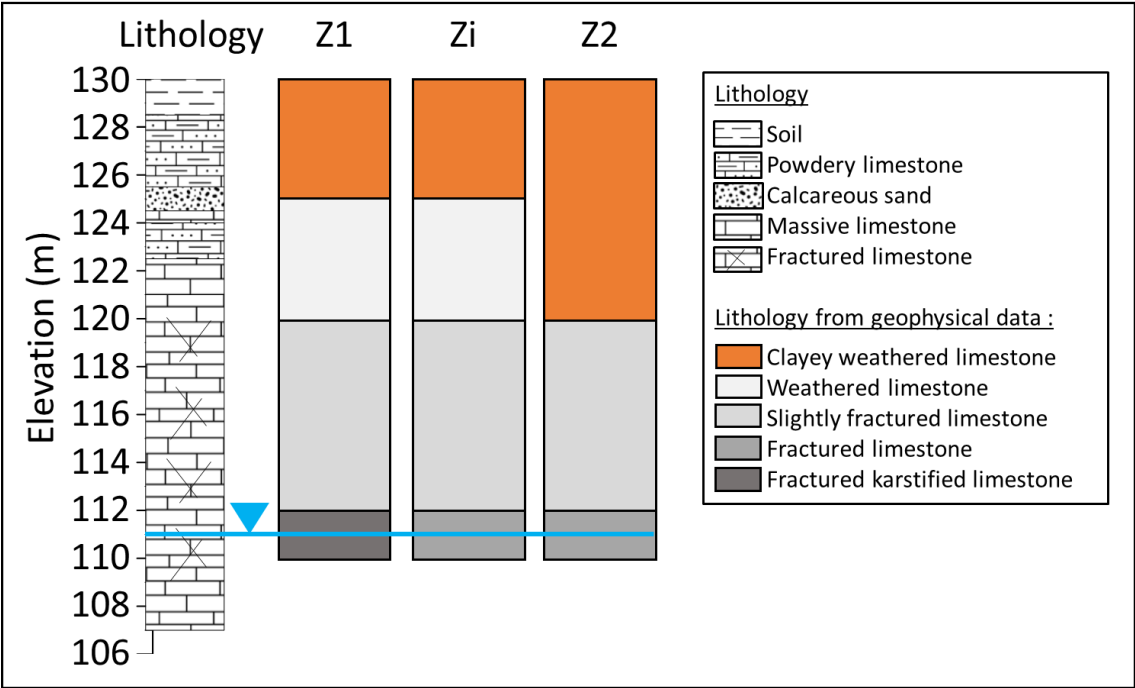


Figure 8 : (A) SNMR water content extracted from the 3D model at the position of the boreholes SC05-6-7-8-9. (B) Total BNMR water content of the boreholes SC05-6-7-8. Note the scale difference between the BNMR and SNMR water content. (C - D) BNMR water content distribution of the boreholes SC06 (zone 1) and SC07 representative of the boreholes SC05-7-8 (intermediate zone). (E) BNMR T_{2ML} of the boreholes SC05-6-7-8 related to the mean pore size. The blue horizontal line is the water table. The black dash lines are the limits position of the interpreted layers.

860



861

862

Figure 9: Lithological model based on the geophysical interpretations at the multi-decametric

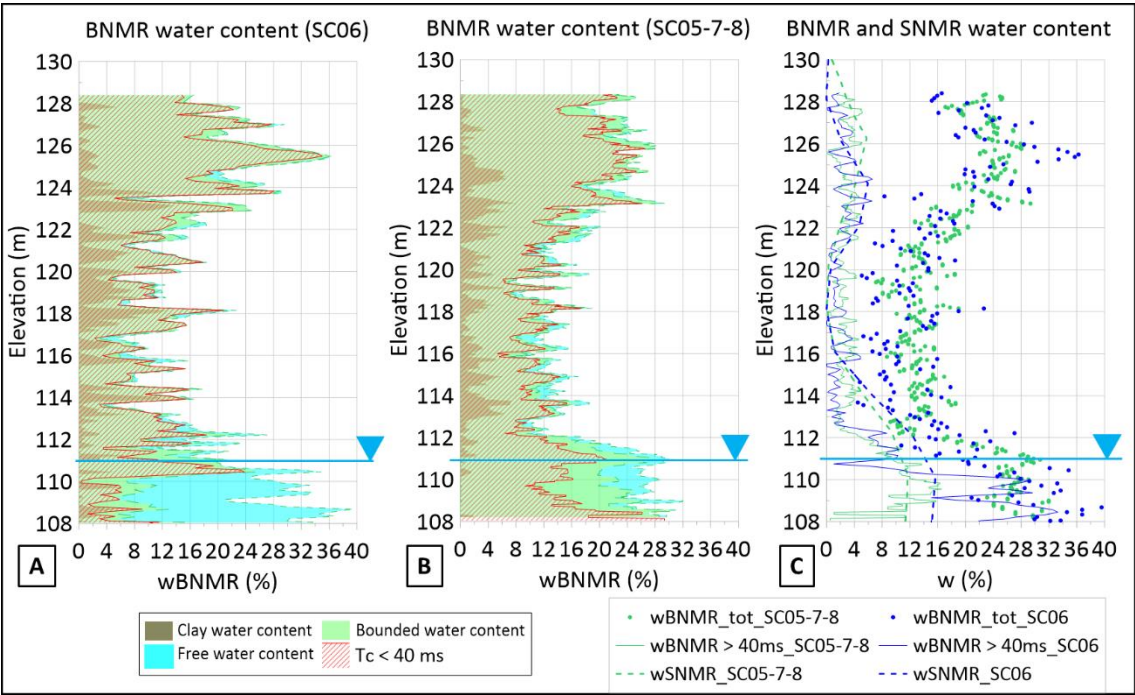
863

and borehole scales in comparison to the site geology illustrated here as a lithologic synthesized

864

from Aldana (left) (Figure). The blue line is the water table.

865



866

Figure 10 : (A) and (B): BNMR cumulated water content and BNMR water content related to the T_2 smaller than the dead-time (40 ms) for the boreholes SC06 and SC05-7-8. (C) Total BNMR water content (dot), BNMR water content related to the T_2 longer than the dead time (40 ms) (line), SNMR total water content (dash line).

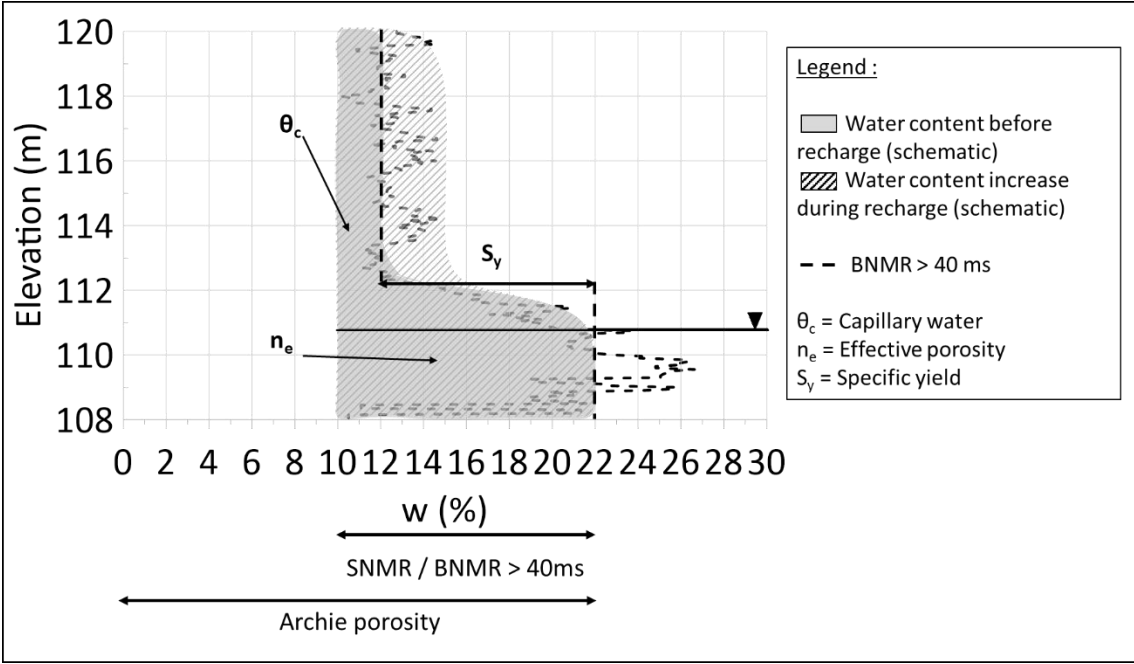


Figure 11 : Schematic water content model of the Beauce fractured limestone based on the SC05-7-8 (Zi) BNMR water content > 40 ms. The black line is the water table. The capillary water, effective porosity and specific yield are based on the conceptual porosity model modified after Lubczynski and Roy, (2005) (Figure)

Figure legends

Figure 1 : Localization of the study site in Villamblain, near Orléans (France), within the Beauce aquifer. Poiseaux and Bricy stations provide respectively GWL and meteorological data. DEM = digital elevation model.

Figure 2 : Summary of the boreholes (SC1, SC2, SC3) geology (A), granulometry (B) and other characteristics from lab measurements (C) of the experimental site (Aldana et al., 2021).

884 Figure 3 : Localization of the geophysical measurements on the investigated area. The data
885 measured in some of the boreholes are borehole-NMR, borehole electrical resistivity and
886 density data.

887 Figure 4 : Conceptual model of porosity modified after Lubczynski and Roy, (2005) in the
888 unsaturated and saturated zones.

889 Figure 5 : Horizontal slices of the 3D model in the vadose zone (top, $Z = 120$ m) and in the
890 aquifer (bottom, $Z = 110$ m). The parameters are the SNMR water content (left), the electrical
891 resistivity (center) and the chargeability (right). The white dots are the boreholes. The gray
892 squares show the zones 1 and 2 with anomalies. The valorized boreholes SC05-6-7-8-9 (black
893 dots) are located on the SNMR horizontal slice ($Z = 110$ m).

894 Figure 6 : (A) SNMR water content vertical section (top), electrical resistivity vertical section
895 with electrical conductivity logs from boreholes (left to right : SC06-SC05-SC07-SC09)
896 (center), chargeability vertical section (bottom), extracted from the 3D model. The blue line is
897 the water table. The vertical black line and black dash line are the positions of the 1D logs
898 extracted from the 3D model in each zone. The white lines are the electrical resistivity isolines
899 at $150 \Omega.m$ and $350 \Omega.m$. The dash white line is the chargeability isoline at 3 mV/V . (B) 1D
900 logs extracted from the 2D profiles: solid lines for the zone 1 and dash lines for the zone 2. The
901 black line is the water table.

902 Figure 7 : Electrical resistivity extracted from the 3D model at the position of the boreholes
903 SC05-6-7-8-9. (B) Electrical resistivity logs of boreholes SC05-6-7-8-9; the resistivities higher
904 than $300 \Omega.m$ are out of the sensitivity range of the tool and are not presented. The black line
905 is a synthetic model based on the borehole data and the gray line is the ERT inversion result of
906 this model. (C) Density logs of boreholes SC05-6-7-8-9. (D) BNMR total water content logs of
907 boreholes SC05-6-7-8. The blue dash line is the water table. The black dash lines are the limits
908 position of the interpreted layers.

Figure 8 : (A) SNMR water content extracted from the 3D model at the position of the boreholes SC05-6-7-8-9. (B) Total BNMR water content of the boreholes SC05-6-7-8. Note the scale difference between the BNMR and SNMR water content. (C - D) BNMR water content distribution of the boreholes SC06 (zone 1) and SC07 representative of the boreholes SC05-7-8 (intermediate zone). (E) BNMR T_{2ML} of the boreholes SC05-6-7-8 related to the mean pore size. The blue horizontal line is the water table. The black dash lines are the limits position of the interpreted layers.

Figure 9: Lithological model based on the geophysical interpretations at the multi-decametric and borehole scales in comparison to the site geology illustrated here as a lithologic synthesized from Aldana (left) (Figure). The blue line is the water table.

Figure 10 : (A) and (B): BNMR cumulated water content and BNMR water content related to the T_2 smaller than the dead-time (40 ms) for the boreholes SC06 and SC05-7-8. (C) Total BNMR water content (dot), BNMR water content related to the T_2 longer than the dead time (40 ms) (line), SNMR total water content (dash line).

Figure 11 : Schematic water content model of the Beauce fractured limestone based on the SC05-7-8 (Zi) BNMR water content > 40 ms. The black line is the water table. The capillary water, effective porosity and specific yield are based on the conceptual porosity model modified after Lubczynski and Roy, (2005) (Figure)

Clémence RYCKEBUSCH

Apport de la tomographie par Résonance Magnétique des Protons pour améliorer la prise en compte du changement d'échelle et des hétérogénéités dans les modèles des transferts hydriques dans la zone non saturée

L'Aquifère de Beauce, l'un des territoires les plus cultivés de France, est sujet à une problématique d'infiltration des nitrates. Les flux de la zone non saturée (ZNS) sont souvent vus comme une recharge moyenne avec un temps de transfert. Cependant, dans les milieux carbonatés comme l'Aquifère de Beauce, il existe aussi des flux rapides associés aux fractures/karsts. La problématique de la thèse est d'améliorer la connaissance des flux hydriques, vecteurs de pollution, dans la ZNS de l'Aquifère de Beauce par des méthodes géophysiques en caractérisant les hétérogénéités locales, en définissant les conditions de suivi du stock d'eau dans la ZNS et en proposant un modèle amélioré des transferts hydriques de la ZNS à l'échelle décimétrique sur le site d'étude. L'interprétation jointe des teneurs en eau mesurées par résonance magnétique nucléaire en surface 3D (SNMR), en forage (BNMR), des résistivités électriques (surface 3D et forage) et des chargeabilités (surface 3D) a permis : 1) d'améliorer la description du site d'étude en identifiant des variations métriques de lithologie et teneur en eau, inexistantes à ce jour, dans les calcaires saturés (fracturation variable, karst) et non saturés (calcaire argileux), aboutissant à un nouveau modèle lithologique « hydro-géophysique » du site. 2) De proposer un modèle de teneur en eau, inexistant à ce jour, mesurable par SNMR et BNMR, permettant de simuler la réponse SNMR à une augmentation de la hauteur d'eau avec la recharge. La mesure, inversion et interprétation d'un suivi de teneur en eau SNMR, comparé aux données existantes, montre que le stock d'eau dans la ZNS peut être suivi par SNMR lors des années avec un volume élevé de pluie efficace annuelle. Le modèle de teneur en eau décimétrique pourra servir de base pour simuler numériquement la dynamique de la ZNS, calé sur un suivi de stock d'eau par SNMR.

Mots clés : résonance magnétique protonique, zone non saturée, Calcaires de Beauce, hétérogénéité spatiale, effet d'échelle

Contribution of Magnetic Resonance Sounding investigations for improving the consideration of scale effects and underground heterogeneities in hydrologic transfer models in the vadose zone

The Beauce aquifer, one of the most cultivated area in France, is subject to an issue of nitrate contamination. Vadose zone water flows are often viewed as a mean recharge with a transition time. However, in carbonate medium like the Beauce aquifer, there are also fast flows related to cracks/karsts. The scientific question of this PhD is to improve the knowledge of water flows, contamination vectors, in the Beauce Aquifer vadose zone with geophysical methods by characterizing local heterogeneities, by identifying the conditions to monitor the vadose zone water stock, and by proposing an improved model of the vadose zone water flows, at decametric scale, on the study site. The cross interpretation of water content measured by surface and borehole nuclear magnetic resonance (SNMR in 3D and BNMR), electrical resistivity (surface 3D and borehole) and chargeability (surface 3D) allowed to: 1) improve the study site description by identifying the metric lithological and water content variations, inexistent to date, in the saturated (variable fracturing, karst) and unsaturated (clayey limestone) limestone. That led to a new hydro-geophysical lithology model of the site. 2) To propose a water content model, inexistent to date, measurable by SNMR and BNMR, allowing simulating the SNMR response to a water column increase with the recharge. The measurement, inversion and interpretation of a SNMR water content vadose zone monitoring, compared to existing data, shows that the vadose zone water stock can be monitored with SNMR during the years with a high annual effective rainfall volume. The decametric water content model will be a basis to simulate numerically the vadose zone dynamic, adjusted with a SNMR water content monitoring.

Keywords: nuclear magnetic resonance, vadose zone, Beauce limestone, spatial heterogeneity, scale effect.