

Mesure des cinétiques hydrogéophysiques aux interfaces

L. Bodet^{1*}, F. Rejiba^{1*}, G. Hovhannissian², S. Pasquet¹, A. Mouhri^{1,3},
S. Flageul¹, Q. Vitale¹, A. Dhemaied⁴, P. Ansart⁵, N. Flipo³ and R. Guérin¹

¹ Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, UMR 7619, METIS

² IRD/UMR 7618 Bioemco, Bondy

³ Centre de Géosciences, Mines ParisTech, Fontainebleau

⁴ Laboratoire Navier, UMR CNRS 8205, École des Ponts ParisTech

⁵ Irstea, UR HBAN, Antony

* Contacts : ludovic.bodet@upmc.fr ; faycal.rejiba@upmc.fr

1 Introduction

La caractérisation et le “monitoring” des ressources en eau souterraine et des processus d’écoulement et de transport associés reposent principalement sur la mise en place de forages (piézomètres). Mais la variété des échelles auxquelles se déroulent ces processus et leur variabilité dans le temps limitent l’interprétation des observations hydrogéologiques. Dans un tel contexte, l’hydrogéophysique fait appel aux méthodes de prospection géophysique afin, notamment, d’améliorer la très faible résolution spatiale des données de forages et de limiter leur caractère destructif ([Guérin, 2005](#); [Hubbard and Linde, 2011](#)). Plus généralement, ces méthodes permettent de proposer une caractérisation de la géométrie du sous-sol, d’identifier et d’estimer les paramètres physiques du milieu ayant une influence sur les écoulements et transports associés, et enfin de suivre l’évolution de ces paramètres au cours du temps pour éventuellement caractériser les flux (d’eau, de polluants etc.).

Parmi les outils géophysiques appliqués à l’hydrogéologie, les méthodes sismiques sont régulièrement utilisées à différentes échelles. La sismique réflexion peut par exemple être déployée pour obtenir des informations sur la structure géologique de certains aquifères ([Bradford, 2002](#); [Haines et al., 2009](#)). La sismique réfraction est quant à elle classiquement choisie pour déterminer la profondeur du toit des nappes, lorsque la surface piézométrique peut être considérée comme une interface du milieu (nappe libre) ([Haeni, 1986](#); [Paillet, 1995](#)). Mais la réponse sismique, en présence de telles interfaces et plus

généralement dans le contexte de la caractérisation de la zone critique et des systèmes aquifères, reste complexe. L'interprétation des vitesses estimées est souvent délicate à cause de leur variabilité en fonction de la lithologie de l'aquifère (paramètres mécaniques intrinsèques et géométrie des milieux poreux le constituant, influence du degré de saturation etc.). La perméabilité du milieu a également un effet sur la géométrie d'un réservoir hydrologique dont les contours peuvent varier en espace comme en temps, compliquant ainsi l'interprétation des données sismiques.

Les géophysiciens cherchent à pallier ces limites, notamment à travers l'étude conjointe des vitesses (V_P et V_S) des ondes compression (P) et de cisaillement (S), dont l'évolution est par définition fortement découplée en présence de fluides. D'un point de vue théorique, cette approche se révèle appropriée à la caractérisation de certains aquifères, en particulier grâce à l'estimation des rapports V_P/V_S ou du coefficient de Poisson ([Bachrach et al., 2000](#)). De récentes études montrent en effet que l'évaluation de ces rapports, ou de paramètres dérivés plus sensibles aux variations de saturation du milieu, peut être pratiquée de manière systématique grâce à la tomographie sismique en réfraction en utilisant parallèlement ondes P et S ([Turesson, 2007](#); [Grelle and Guadagno, 2009](#); [Mota and Monteiro Santos, 2010](#)). Mais d'un point de vue pratique, la mesure de V_S reste délicate à mettre en oeuvre car les ondes S sont souvent difficiles à générer et à identifier sur les enregistrements ([Jongmans and Demanet, 1993](#); [Xia et al., 2002](#)).

Une alternative peut-être proposée par l'estimation indirecte de V_S à partir de l'inversion de la dispersion des ondes de surface ([Gabriels et al., 1987](#); [Jongmans and Demanet, 1993](#); [Park et al., 1999](#); [Socco and Strobbia, 2004](#); [Socco et al., 2010](#)). Cette méthode ne permet cependant d'obtenir qu'un modèle unidimensionnel (1D) des V_S du milieu en fonction de la profondeur, à l'aplomb d'un dispositif sismique. Elle souffre par ailleurs de diverses limites théoriques et expérimentales justifiant le besoin de développements méthodologiques ([Bodet et al., 2005, 2009](#)). La prospection par ondes de surface peut être déployée le long de sections linéaires ou selon une maille de surface, dans le but de reconstruire un modèle 2D ou 3D de distribution des V_S du sous-sol. Cet aspect présente un intérêt notamment dans l'objectif de pallier les limites de la prospection par ondes S. L'inversion de la dispersion des ondes de surface a ainsi été récemment proposée comme outils de caractérisation 2D des paramètres hydrogéologiques du sous-sol ([Cameron and Knapp, 2009](#); [Konstantaki et al., 2013](#)). Mais la propagation des ondes de surface dans les milieux poreux, d'intérêt croissant pour de nombreux champs d'application, ainsi que l'influence du contenu en fluides, nécessitent d'importants développements théoriques et expérimentaux avant de pouvoir proposer une ou plusieurs méthodes

opérationnelles.

D’une manière générale, les ondes de surface sont omniprésentes dans la majorité des enregistrements sismiques classiques (réflexion, réfraction) et leur propagation est très fortement liée à V_S . Nous proposons donc de tirer profit de ces propriétés afin d’appliquer simultanément sismique réfraction en ondes P et inversion de la dispersion des ondes de surface dans le contexte de la caractérisation des réservoirs hydrologiques. Au-delà d’aspects essentiellement méthodologiques, la problématique principale de ces travaux sera de discriminer l’influence, sur les mesures sismiques, du contenu en eau (voire de son écoulement), de celle de la variabilité des paramètres intrinsèques du milieu. Les travaux de thèse de Sylvain Pasquet (thèse UMR 7619 METIS, UPMC, 2011-2014) ont permis la mise au point d’une méthodologie optimale pour l’exploitation simultanée de ondes P et de surface des enregistrements sismiques, vers une interprétation conjointe de V_P et V_S . Comme application de cette approche à la caractérisation de la zone critique, du continuum sol-aquifère et des transferts dont il fait l’objet, une première étude en conditions réelles de l’apport (en complément d’autres données géophysiques et d’informations hydrogéologiques) des vitesses sismiques et paramètres dérivés a été conduite dans le cadre du pilier “interfaces nappe-rivière” (du programme de recherche PIREN Seine). Ce rapport présente par ailleurs des travaux préliminaires de suivi de flux par tomographie de résistivité électrique 3D.

2 Apport des méthodes sismiques à la caractérisation des nappes

Le site choisi pour mettre en oeuvre l’approche proposée *supra* est situé sur le bassin versant expérimental de l’Orgeval (Fig. 1a), à l’est de Paris, associé au SOERE géré par le GIS ORACLE ainsi qu’au PIREN SEINE. Le bassin, constitué d’un système aquifère multicouches, est doté de plusieurs stations permanentes de mesures (piézomètres, capteurs de température et de pression etc.). Des campagnes synchrones de mesure des niveaux piézométriques ont permis d’établir des cartes piézométriques pour les hautes et basses eaux de 2009 et 2011. La structure souterraine du bassin a été définie en utilisant la carte géologique au 1/50000 couplée à de vastes études géophysiques : sondages électromagnétiques dans le domaine temporel (TDEM) ; sondages électriques ; ERT (Fig. 1b). Les campagnes géophysiques ont notamment été effectuées afin d’améliorer la description de la géologie de surface et les connectivités potentielles entre les cours d’eau et les deux aquifères sous-jacents (Mouhri et al., 2013). La partie supérieure du système aquifère est à présent bien caractérisée du point de vu lithologique, sur l’ensemble du bassin versant (Fig. 1c). Mais la possible variabilité des propriétés

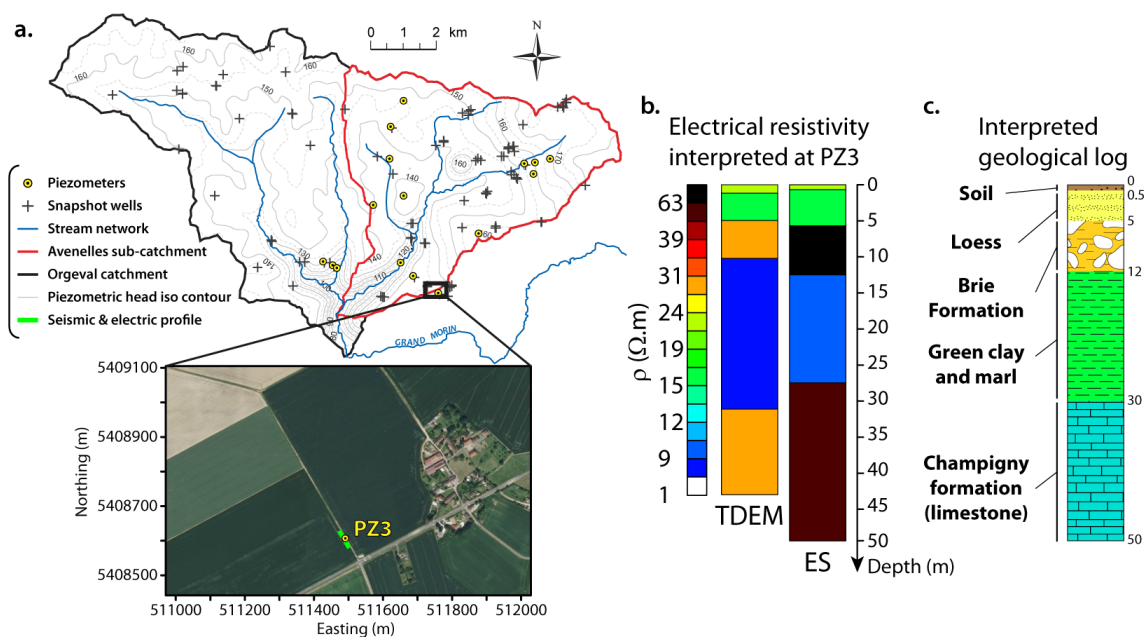


FIGURE 1 – Figure tirée de *Pasquet et al. (Soumis)* : (a) Situation du bassin expérimental de l’Orgeval et position des expériences. (b) Sondages électriques et TDEM interprétés en PZ3. (c) Log géologique interprété en PZ3.

intrinsèque de chaque couche confine l’interprétation hydrodynamique des données au voisinage des piézomètres. Deux campagnes sismiques ont été conduites en 2013, en plateau, sur un secteur (près du lieu-dit Les Granges) à l’aplomb duquel le système peut a priori être considéré comme 1D. Les périodes choisies pour les campagnes correspondent à celles des hautes eaux (mars 2013, HW sur la Fig. 2a) basses eaux (août 2013, LW sur la Fig. 2a). Des profils ERT, réalisés en parallèle de la sismique (Fig. 2b), ont confirmé la tabularité de la zone d’étude. Le dispositif sismique, centré sur un piézomètre de l’aquifère supérieur (PZ3 sur la Fig. 1a) a été mis en oeuvre de façon à acquérir à la fois des données en ondes P et SH (Fig. 3). Une interprétation simple des données “en réfraction P et SH” fournit des modèles de vitesses en très bon accord avec la stratification connue (Fig. 4). L’interprétation de la dispersion des ondes de surface également, comme le prouve un recalcul de la dispersion à partir des modèles interprétés présenté sur la figure (Fig. 4b et d). Les rapports V_P/V_S montrent par ailleurs un fort contraste en profondeur, cohérent avec le niveau piézométrique. Cela semble confirmer l’hypothèse d’une nappe libre dans ce secteur (*Pasquet et al., Soumis*). Une étude en laboratoire en cours (financement pour 2014 du programme national EC2CO-Biohefect) devrait permettre de comprendre l’écart cependant observé (Fig. 4b) entre le toit de la nappe et l’interface de réfraction interprétée (écarts probablement liés à la non prise en compte de la frange capillaire dans l’interprétation des données).

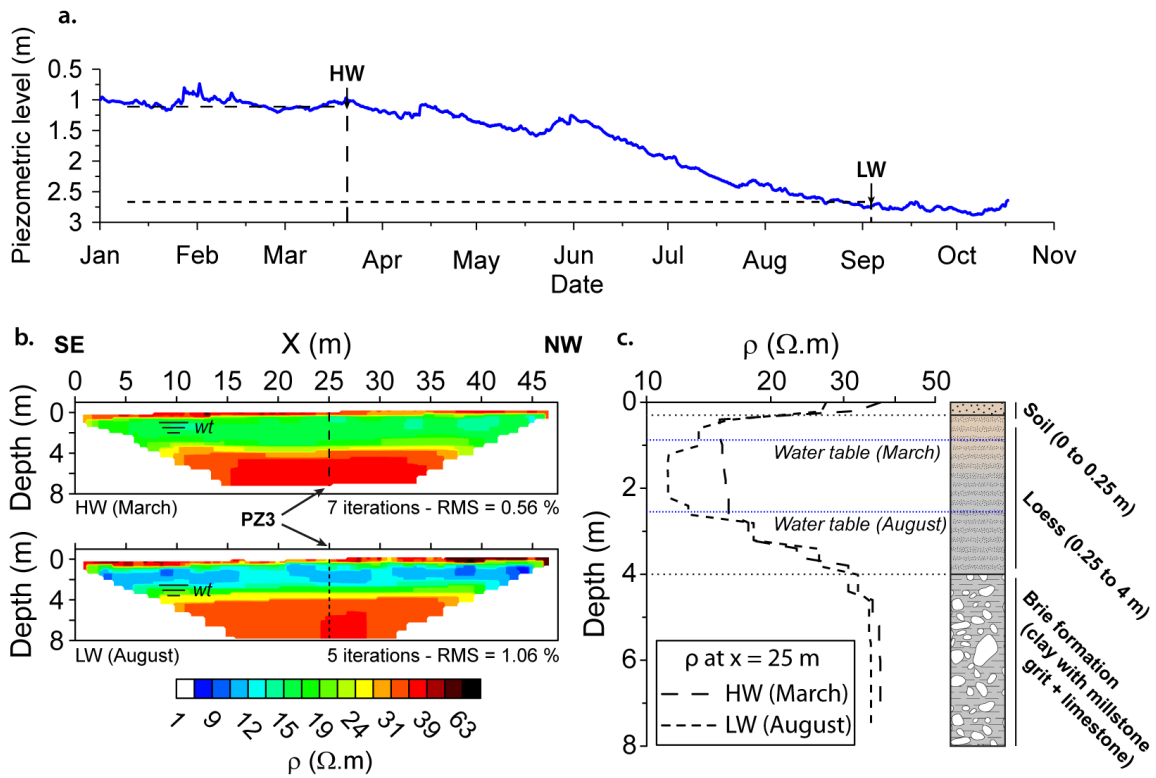


FIGURE 2 – Figure tirée de *Pasquet et al. (Soumis)* : (a) Niveau piézométrique mesuré en PZ3 entre Janvier et Octobre 2013. Les campagnes sismiques ont été conduites du 12 au 14 mars 2013 en période de hautes eaux (HW), et du 26 au 28 Août en période de basses eaux (LW). (b, c) Valeurs de résistivités électriques (ρ) interprétées par ERT durant les deux campagnes et comparaison au log géologique réinterprété en PZ3.

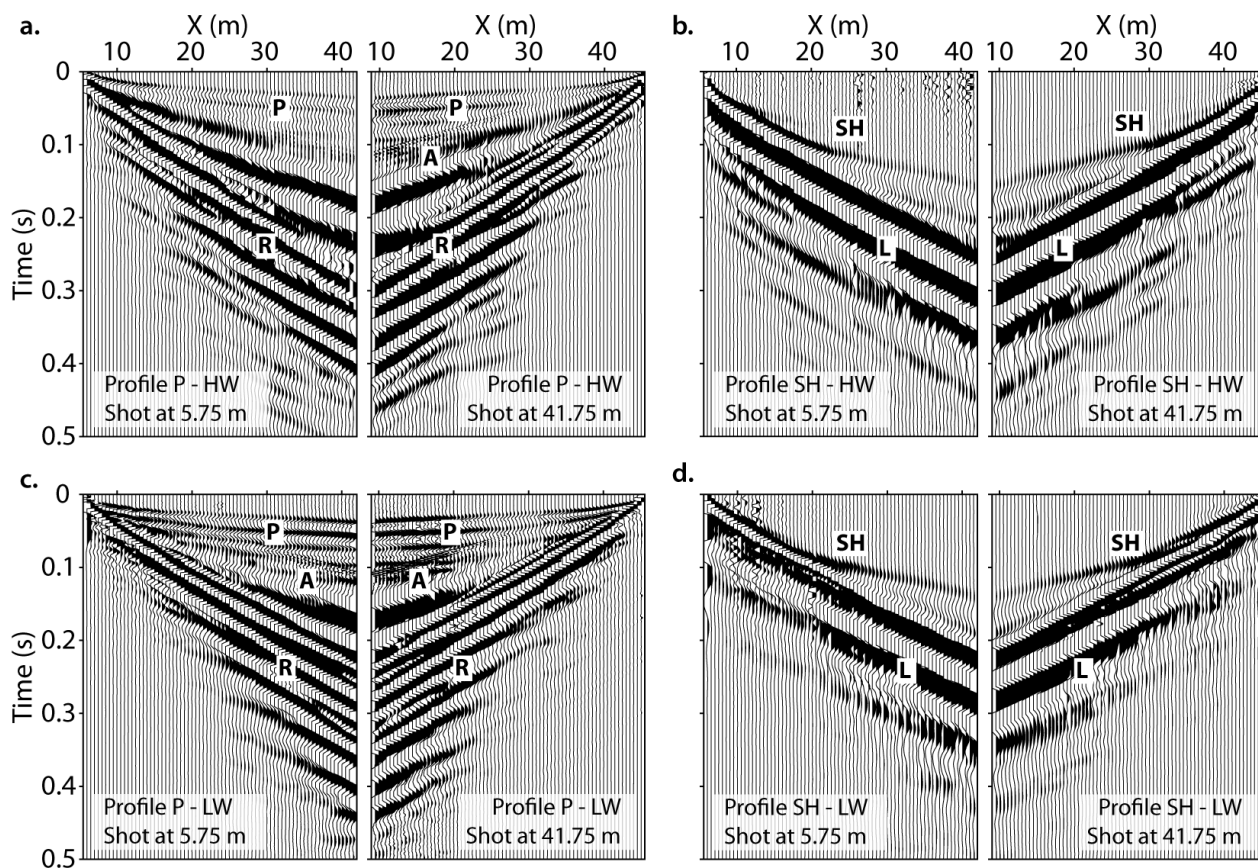


FIGURE 3 – Figure tirée de [Pasquet et al. \(Soumis\)](#) : Tirs direct ($x = 5.75$ m) et inverse ($x = 41.75$ m) enregistrés en période de hautes eaux (HW) avec des géophones verticaux (a) et horizontaux (b). Tirs direct ($x = 5.75$ m) et inverse ($x = 41.75$ m) enregistrés en périodes de basses eaux (LW) avec des géophones verticaux (c) et horizontaux (d). Les ondes P (P), sonore (A) et les ondes de Rayleigh apparaissent clairement sur les sismogrammes enregistrés avec des géophones verticaux. Les ondes SH (SH) et les ondes de Love apparaissent clairement sur les sismogrammes enregistrés avec des géophones horizontaux.

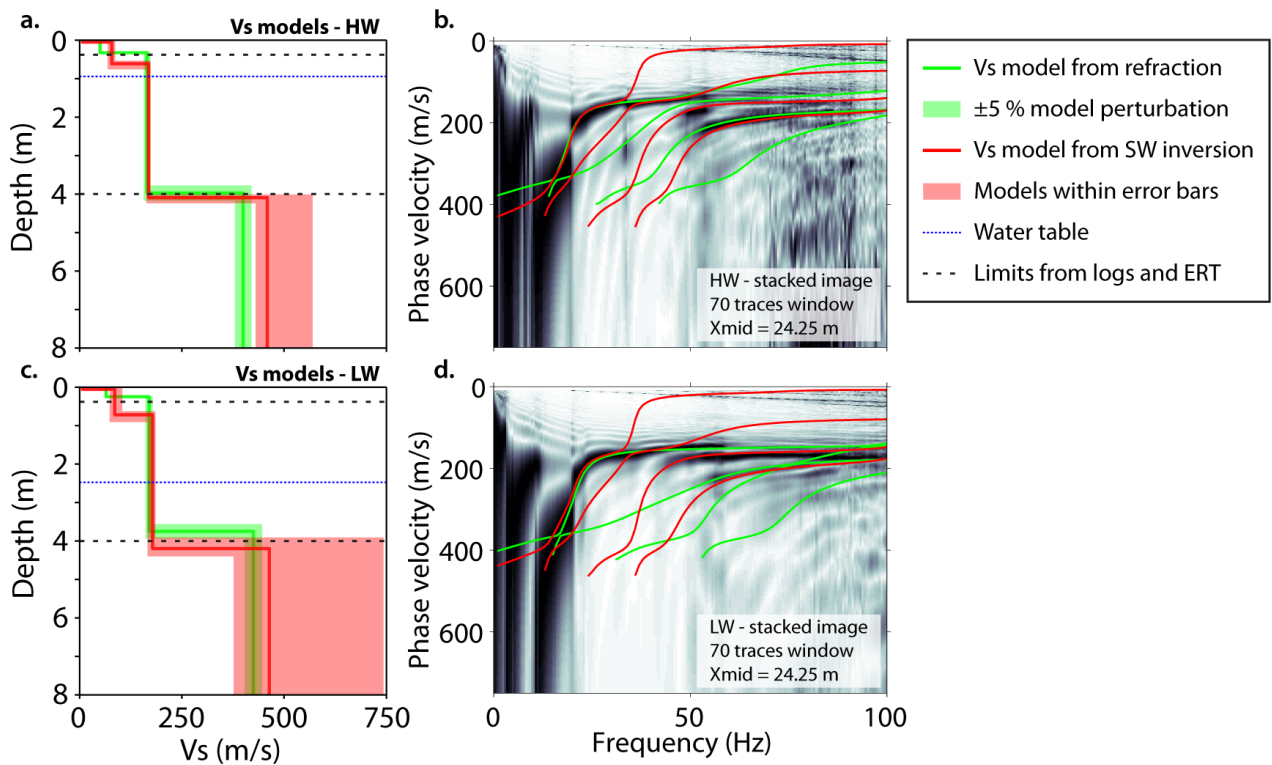


FIGURE 4 – Figure tirée de *Pasquet et al. (Soumis)* : Comparaison des modèles 1D de V_S obtenus à partir de l'interprétation des ondes SH (en vert) et des ondes de surface (en rouge) en périodes de hautes eaux (HW, a) et de basses eaux (LW, c). Les courbes de dispersion calculées à partir des modèles tirés des ondes SH (en vert) et de surface (en rouge) sont superposées aux images de dispersion obtenues en hautes eaux (HW, b) et basses eaux (LW, d).

Une présentation détaillée des résultats a été soumise par Sylvain Pasquet (thèse UPMC 2011-2014) et collaborateurs à Journal of Applied Geophysics en février 2014 ([Pasquet et al.](#), [Soumis](#)).

3 Suivi de flux par tomographie de résistivité électrique 3D

Concernant l'évaluation des flux hydriques aux interfaces, les méthodes s'appuyant sur les mesures de résistivités électriques par tomographie (ERT) sont particulièrement adaptées. Ceci est particulièrement le cas lors d'expérience d'injection de solution saline, et du suivi du front de salinité associé. Les suivis de résistivités électriques sont généralement mis en œuvre en le long de profils (transects). La présente expérience effectuée sur le site de Bergeresse a permis de jauger une approche en 3D sur la rive droite du ru de la Loge. L'objectif consiste à évaluer le potentiel de connectivité entre la formation argilo-limoneuse de surface et ou la formation de Brie avec le ru, à une échelle local (décimétrique). L'acquisition (Fig. 5) a été effectuée avec un dispositif pôle-pôle (192 électrodes, 50 cm entre électrodes), mis en place en parallèle sur un maillage (x-y) 2D régulier (3 m×11 m), ainsi que sur un transect symétrique traversant le ru (6.8 m de longueur). En pratique, l'injection de solutions saline (NaCl) a été effectué à deux endroits : d'abord dans le piézomètre rive droite (point vert sur la figure) s'arrêtant dans la formation de Brie (argile à meulière) du dispositif MOLONARI de Bergeresse, et ensuite, dans un forage de 80 cm de profondeur s'arrêtant dans les limons de plateau (point rouge sur la figure Fig. 5).

La figure 6 représente les surfaces d'isovaleurs indiquant une diminution de 12% de la résistivité interprétée au bout de 5 heures (en marron) et de 23 heures (en vert) par rapport à une mesure de référence sans injection. Sont aussi représentées, les sections de variations relatives de résistivités interprétées sur le transect traversant la rivière également après 5 heures et 23 heures après le temps de référence ; l'échelle des variations est ici plafonnée à 5%. Les principaux résultats préliminaires indiquent que :

- lors d'une injection dans les limons, les variations de résistivité sont limitées à quelques dizaines de centimètres. En l'absence d'effet gravifique, cela permet en théorie d'estimer une conductivité hydraulique horizontale. Au regard des faibles perméabilités, il sera nécessaire d'observer les variations sur des intervalles plus importants (probablement de l'ordre de la semaine) ;
- le développement du bulbe d'infiltration au niveau du piézomètre est clairement de type gravifique avec un étirement vertical prononcé, par ailleurs se développant légèrement à contresens de l'écoulement en rivière. Les prochains essais devront probablement se limiter à des injec-

tions mieux calibrés (< 5 litres) en terme de volume injecté afin d'éviter une saturation trop importante ;

- les variations observées sur le transect en rivière indiquent clairement une diminution au niveau du piézomètre, mais pas de variations significatives au niveau de la zone hyporhéique environ 2 m plus en aval où le transect est implanté. Par ailleurs aucune variations de résistivité de l'eau de rivière n'ont été enregistré quelques mètres à l'aval du transect.

Ces résultats préliminaires sont à moduler au regard de la cinétique réelle de tels mécanismes d'écoulement s'exerçant sur des formations très peu perméables (du moins dans les limons-argileux), ils sont donc à interpréter avec précaution. Il n'en reste pas moins que ces résultats constituent une très bonne base de calibration pour la mise en place d'un suivi effectif lors d'une injection de solution saline. Il est donc possible d'établir des recommandations pour la suite des travaux de suivi par méthodes électriques :

- le dispositif pôle-pôle avec 192 électrodes, permettent de finaliser une acquisition 3D et transect rivière en moins d'une heure et demi, ce qui semble parfaitement suffisant au regard des cinétiques d'écoulement présumées ;
- les périodes de mesures doivent être étendues au moins sur une semaine lorsque l'injection est situé dans les limons, et très probablement à moins de 10 m du ru. Il est difficile d'imaginer la possibilité de mesurer des variations significatives sur des emprises significatives si l'injection est effectuer plus loin ;
- la résolution associée à un écartement de 50 cm entre électrode est pertinente, mais limite l'emprise de la zone d'investigation. Un suivi à l'aide plusieurs transects (distants de un ou deux mètres) le long du ru, avec un écartement de 1m entre électrode serait probablement un bon compromis (résolution, volume investigué) ;
- la technique d'inversion est un élément clef de la quantification des variations de résistivités. On constate que les variations relatives issues d'analyse 2D et 3D ne sont pas similaires. Ceci est tout à fait normal au regard des différences de sensibilités des modèles directes (respectivement 2D et 3D) utilisés pour l'inversion. Pour l'inversion 2D en rivière, l'écartement de 50 cm entre électrode sur un ru de moins de 2 m de large, ainsi que la nécessité de prendre en compte la hauteur d'eau pour les électrodes immergées influent de manière non négligeable le calcul directe. Sur de si petite section l'écartement entre électrode devra être adapté pour échantillonné plus finement le profil et particulièrement dans la rivière. A terme l'inversion time lapse (inversion des

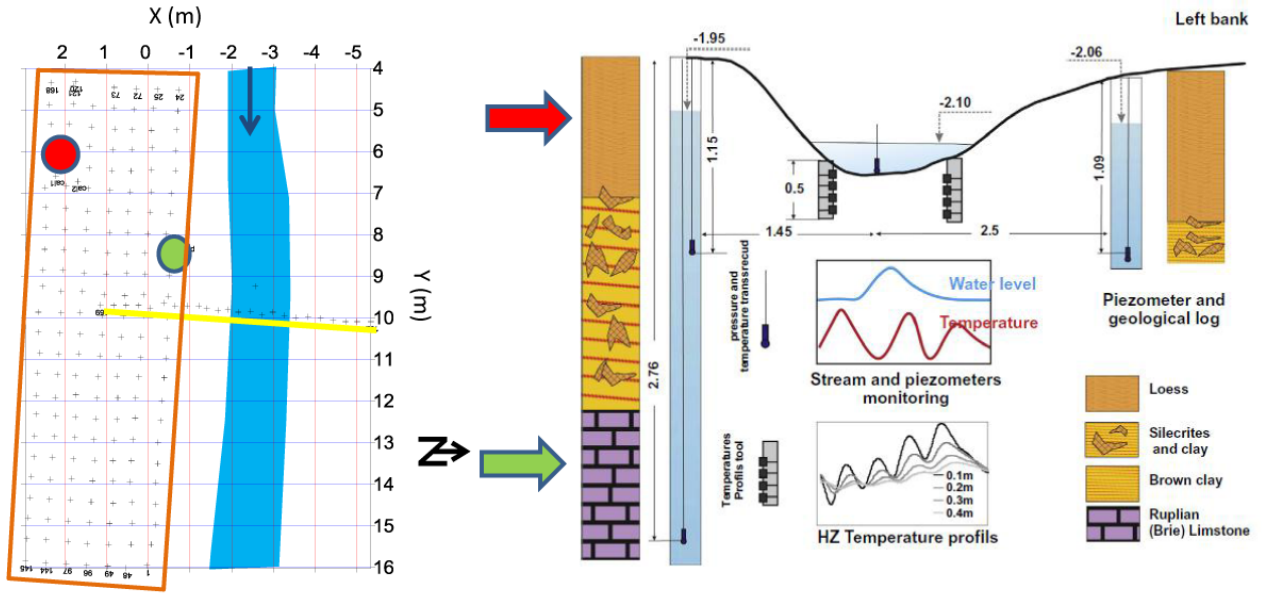


FIGURE 5 – Figure tirée de [Rejiba et al. \(2014\)](#). A gauche : isopositif de mesures de résistivités électriques. A droite : positionnement des électrodes et sections instrumentées du ru (log, situations des points d'injection, piézomètres rive droite et gauche), modifié d'après [Mouhri et al. \(2013\)](#).

différences de résistivités apparentes) devra être testée et comparée aux calculs des variations relatives sur les sections préalablement inversées.

4 Conclusions

Parmi les méthodes géophysiques appliquées à l'hydrogéologie, la prospection sismique est souvent confinée à la caractérisation de la géométrie des aquifères. L'étude combinée des vitesses des ondes sismiques de compression (P) et de cisaillement (SH) (respectivement V_P et V_S) peuvent pourtant fournir des informations sur les propriétés intrinsèques des roches, comme il est souvent pratiqué en exploration pétrolière. Cette approche a été récemment proposée pour l'étude d'aquifères en milieu sableux via l'estimation du rapport V_P/V_S . Afin de répondre à ces questions dans le cadre de systèmes plus complexes (milieux non-consolidés, hétérogènes ou de faibles perméabilités), des acquisitions sismiques en ondes P et SH ont été réalisées sur le bassin expérimental de l'Orgeval (GIS ORACLE). Ce bassin draine un système aquifère multicouche surveillé notamment par un réseau de piézomètres. La partie supérieure de l'aquifère est caractérisée par des couches tabulaires, bien délimitées dans tout le bassin grâce à de précédentes campagnes de tomographie de résistivité électrique (ERT) et de sondages électromagnétiques dans le domaine temporel (TDEM), corrélées aux données de forages. La variabil-

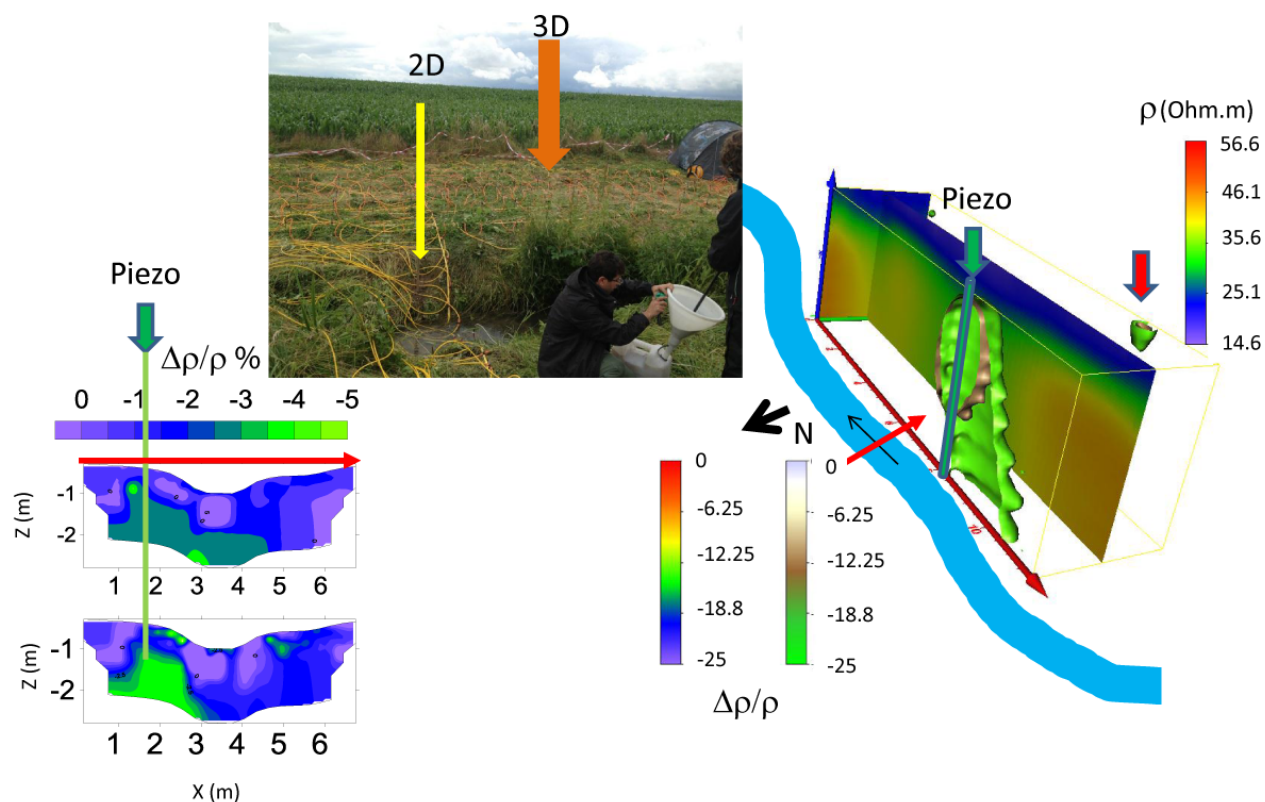


FIGURE 6 – Figure tirée de [Rejiba et al. \(2014\)](#). Résistivités interprétées après une acquisition 3D (à droite) et transect rivière (à gauche). Sur l'illustration des isovaleurs 3D, un seuil à 12% est utilisé (marron et vert sur deux échelles de couleurs distinctes). Ce seuil est ramené à 5% pour les sections 2D traversant la rivière.

ité latérale des propriétés intrinsèques de chaque couche soulève néanmoins des questions concernant l'hydrodynamique de l'aquifère supérieur et la validité des interpolations entre piézomètres. Dans un premier temps, les dispositifs sismiques ont été implantés sur une zone simple (*i.e.* approximativement 1D – zone de plateau) du bassin, au voisinage d'un piézomètre opérationnel. Une interprétation simple des premières arrivées des ondes P et SH a conduit à des modèles 1D de vitesses sismiques correspondant à la stratification du site. En périodes de hautes eaux (mars 2013) comme en basses eaux (août 2013), les rapports V_P/V_S obtenus montrent de forts contrastes en profondeur en accord avec les niveaux de nappe observés. Ces résultats validant notre approche 1D, des expériences en 2D ont récemment été mises en œuvre sur un site plus complexe du bassin (berge de rivière). Il s'agira à terme d'aborder l'approche 3D en parallèle aux récents développements proposés en ERT pour le suivi des flux à l'interface nappe-rivière. Sur ce point, les principales difficultés à surmonter concernent l'échantillonnage spatial (implantation des électrodes en surface) et la séquence d'acquisition optimale au regard du compromis nécessaire à trouver entre le volume de sol intégré et la cinématique des flux. Pour aider à décrire cette cinématique, un prototype de sonde amovible multi-profondeur (40cm de longueur) permettant la mesure couplée de température haute résolution et de résistivité électrique apparente a été développé. La calibration fine du dispositif fait encore l'objet de développements de façon à atteindre des résolutions de l'ordre du centième de degré Celsius. Une version suivante, en cours d'élaboration, permettra d'incorporer 16 voies de mesures et d'accroître significativement la résolution spatiale des mesures et de produire l'équivalent de panneaux électriques en forage.

Références

- Bachrach, R., Dvorkin, J., Nur, A., Jan. 2000. Seismic velocities and Poisson's ratio of shallow unconsolidated sands. *Geophysics* 65 (2), 559–564.
 URL <http://geophysics.geoscienceworld.org/content/65/2/559>
- Bodet, L., Abraham, O., Clorennec, D., May 2009. Near-offset effects on Rayleigh-wave dispersion measurements : Physical modeling. *Journal of Applied Geophysics* 68 (1), 95–103.
 URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985109000317>
- Bodet, L., van Wijk, K., Bitri, A., Abraham, O., Côte, P., Grandjean, G., Leparoux, D., Jun. 2005. Surface-wave inversion limitations from laser-Doppler physical modeling. *Journal of Environmental*

and Engineering Geophysics 10 (2), 151–162.

URL <http://jeeg.geoscienceworld.org/content/10/2/151>

Bradford, J. H., Jan. 2002. Depth characterization of shallow aquifers with seismic reflection, part I—The failure of NMO velocity analysis and quantitative error prediction. *Geophysics* 67 (1), 89–97.

URL <http://geophysics.geoscienceworld.org/content/67/1/89>

Cameron, A., Knapp, C., 2009. A new approach to predict hydrogeological parameters using shear waves from multichannel analysis of surface waves method. In : *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. EEGS, Fort Worth, Texas, p. 475.

URL <http://library.seg.org/doi/abs/10.4133/1.3176727>

Gabriels, P., Snieder, R., Nolet, G., Feb. 1987. In situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode rayleigh waves. *Geophysical Prospecting* 35 (2), 187–196.

URL <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2478.1987.tb00812.x/abstract>

Grelle, G., Guadagno, F. M., Jul. 2009. Seismic refraction methodology for groundwater level determination : “Water seismic index”. *Journal of Applied Geophysics* 68 (3), 301–320.

URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2009JAG....68..301G>

Guérin, R., Feb. 2005. Borehole and surface-based hydrogeophysics. *Hydrogeology Journal* 13 (1), 251–254.

URL <http://www.springerlink.com/content/duawp6lvp3htwxpg/>

Haeni, F. P., Feb. 1986. Application of seismic refraction methods in groundwater modeling studies in new england. *Geophysics* 51 (2), 236–249.

URL <http://link.aip.org/link/?GPY/51/236/1&Agg=doi>

Haines, S. S., Pidlisecky, A., Knight, R., Oct. 2009. Hydrogeologic structure underlying a recharge pond delineated with shear-wave seismic reflection and cone penetrometer data. *Near Surface Geophysics* 7 (5-6), 329–339.

URL <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=32576>

Hubbard, S., Linde, N., 2011. Hydrogeophysics. In : *Treatise on Water Science*. Elsevier, Oxford, pp. 401–434.

URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444531995000439>

Jongmans, D., Demanet, D., May 1993. The importance of surface waves in vibration study and the use of rayleigh waves for estimating the dynamic characteristics of soils. *Engineering Geology* 34 (1–2), 105–113.

URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001379529390046F>

Konstantaki, L., Carpentier, S., Garofalo, F., Bergamo, P., Socco, L. V., Aug. 2013. Determining hydrological and soil mechanical parameters from multichannel surface-wave analysis across the alpine fault at inchbonnie, new zealand. *Near Surface Geophysics* 11 (4), 435–448.

URL <http://nsg.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=70539>

Mota, R., Monteiro Santos, F., Dec. 2010. 2D sections of porosity and water saturation from integrated resistivity and seismic surveys. *Near Surface Geophysics* 8 (6), 575–584.

URL <http://nsg.eage.org/details.php?pubid=43264>

Mouhri, A., Flipo, N., Rejiba, F., de Fouquet, C., Bodet, L., Kurtulus, B., Tallec, G., Durand, V., Jost, A., Ansart, P., Goblet, P., Nov. 2013. Designing a multi-scale sampling system of stream–aquifer interfaces in a sedimentary basin. *Journal of Hydrology* 504, 194–206.

URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169413006896>

Paillet, F., 1995. Integrating surface geophysics, well logs and hydraulic test data in the characterization of heterogeneous aquifers. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 1 (1), 1–13.

URL <http://library.seg.org/doi/abs/10.4133/JEEG1.A.1>

Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., Jan. 1999. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics* 64 (3), 800–808.

URL <http://geophysics.geoscienceworld.org/content/64/3/800>

Pasquet, S., Bodet, L., Dhemaied, A., Mouhri, A., Vitale, Q., Rejiba, F., Flipo, N., Guérin, R., Soumis. Detecting different water table levels in a shallow aquifer with combined P-, surface and SH-wave surveys : insights from V_p/V_s or poisson's ratios. *Journal of Applied Geophysics*.

Rejiba, F., Bodet, L., Hovhannissian, G., Pasquet, S., Mouhri, A., Vitale, Q., Dhemaied, A., Ansart, P., Flipo, N., 2014. Mesure des cinétiques hydrogéophysiques aux interfaces. In : Colloque PIREN-Seine, 5-7 février 2014.

Socco, L. V., Foti, S., Boiero, D., 2010. Surface-wave analysis for building near-surface velocity models

- established approaches and new perspectives. *Geophysics* 75 (5), A83–A102.

URL <http://link.aip.org/link/GPYSA7/v75/i5/p75A83/s1&Agg=doi>

Socco, L. V., Strobbia, C., Nov. 2004. Surface-wave method for near-surface characterization : a tutorial. *Near Surface Geophysics* 2 (4), 165–185.

URL <http://nsg.eage.org/details.php?pubid=8126>

Turesson, A., Feb. 2007. A comparison of methods for the analysis of compressional, shear, and surface wave seismic data, and determination of the shear modulus. *Journal of Applied Geophysics* 61 (2), 83–91.

URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092698510600053X>

Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B., Wightman, E., Nigbor, R., Aug. 2002. A pitfall in shallow shear-wave refraction surveying. *Journal of Applied Geophysics* 51 (1), 1–9.

URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985102001970>