

Contribution des méthodes sismiques à l'hydrogéophysique : avancées récentes dans le cadre du CRITEX

Contribution of seismic methods to hydrogeophysics: recent advances within CRITEX

Sylvain PASQUET⁽¹⁾, Ludovic BODET⁽¹⁾ et Roger GUÉRIN⁽¹⁾

⁽¹⁾ Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, CNRS, EPHE, UMR 7619 METIS, 4 place Jussieu,
75005 PARIS, FRANCE
sylvain.pasquet@upmc.fr

I. INTRODUCTION

La caractérisation et la surveillance des systèmes aquifères et des processus d'écoulement et de transport associés s'appuient principalement sur des données piézométriques et de forage, c'est-à-dire sur des informations locales. Délimiter les variations spatiales de lithologie entre ces piézomètres est une tâche délicate, qui génère inévitablement des erreurs pouvant se propager dans les modèles hydrologiques. Dans ce cas, les méthodes d'imagerie géophysique fournissent des outils permettant d'interpoler les données de forages et d'estimer les hétérogénéités du modèle géologique. Les méthodes électromagnétiques dans le domaine temporel (TDEM), les sondages électriques (ES) et la tomographie de résistivité électrique (ERT) sont régulièrement mis en place pour évaluer la structure géologique régionale et la connectivité locale entre les réseaux de cours d'eau et les différentes unités aquifères. Toutefois, si les méthodes électriques et électromagnétiques montrent leur efficacité pour la caractérisation multi-échelle de la lithologie, elles peinent à détecter le niveau de la nappe phréatique dans des formations de socles ou argileuses.

Dans le cadre de l'équipex CRITEX¹, les méthodes sismiques ont été proposées, parallèlement à l'ERT, afin : (i) d'améliorer la faible résolution spatiale des données de forages, (ii) de proposer une caractérisation de la géométrie du sous-sol, et (iii) d'estimer les paramètres physiques (mécanique, électrique, etc.) du milieu influencés par la présence d'eau et les processus d'écoulement et de transport associés. L'étude conjointe des vitesses de propagation (V_p et V_s) des ondes de compression (P) et de cisaillement (S), dont l'évolution est fortement découplée en présence de fluide, a ainsi été proposée à travers l'estimation du rapport V_p/V_s et du coefficient de Poisson ν , l'objectif final étant d'obtenir des informations sur les variations spatiales de teneur en eau dans le milieu.

Si les méthodes sismiques en ondes P sont classiquement utilisées pour estimer V_p , la mesure de V_s reste délicate à mettre en œuvre car les ondes S sont souvent difficiles à générer et à identifier sur les enregistrements sismiques. Une alternative à la sismique réfraction en ondes S est proposée par l'estimation indirecte de V_s à partir de l'inversion de la dispersion des ondes de surface (voir p. ex. Socco et al., 2010). Si les méthodes en ondes de surface permettent d'obtenir des modèles 1D de V_s de façon relativement simple, des outils de traitement avancés sont nécessaires pour reconstruire des modèles 2D de distribution des V_s du sous-sol. Dans ce cas, des techniques de fenêtrage spatial et de sommation de la dispersion sont utilisées afin de restreindre l'étendue latérale des mesures de la dispersion (voir p. ex. Bergamo et al., 2012). Il semble donc prometteur et attrayant en termes de coût et de temps d'acquisition de mettre en œuvre une telle approche pour estimer simultanément V_p et V_s , notamment pour des applications en proche surface. Une méthodologie d'acquisition combinant les méthodes sismiques en ondes de compression et de surface a donc été élaborée afin d'estimer le rapport V_p/V_s à partir d'un dispositif d'acquisition unique.

¹ Le projet CRITEX a pour objectifs de décrire le fonctionnement hydrologique, hydrogéologique et géochimique de la zone critique des bassins versants à l'aide d'un parc national d'équipements innovants.

II. VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE

La méthodologie mise en place a systématiquement consisté en une acquisition simultanée en ondes P et de surface. Pour cela, un enregistreur sismique à 72 canaux a été utilisé avec des géophones 14 Hz à composante verticale. Selon le type d'aquifère étudié, l'espacement inter-trace a été adapté pour optimiser la résolution et la profondeur d'investigation. Les tirs sismiques ont été réalisés en utilisant une plaque d'aluminium heurtée verticalement par une masse de 5 kg. Les temps de première arrivée des ondes P ont été pointés sur les sismogrammes, puis interprétés pour estimer des modèles 1D ou 2D de vitesse V_p . Les enregistrements en ondes P ont également permis d'extraire la dispersion des ondes de surface. Pour cela, une fenêtre d'extraction adaptée à la variabilité latérale du milieu ausculté a été sélectionnée pour chaque sismogramme. Ces portions de sismogramme ont ensuite été transformées dans le domaine fréquence-vitesse de phase où les maxima correspondent aux différents modes de propagations des ondes de surface. Pour finir, les vitesses de propagation des ondes de surface ont été pointées sur ces images de dispersion, puis inversées pour estimer successivement des modèles 1D de V_s .

Afin de valider cette méthodologie pour des applications hydrogéologiques, des mesures ont dans un premier temps été réalisées sur un site simple situé dans le bassin de l'Orgeval (70 km à l'est de Paris, France). Ce bassin fait partie d'un observatoire géré par le réseau ORACLE et est étudié depuis une cinquantaine d'années, notamment par le PIREN Seine. Il draine un système aquifère stratifié caractérisé par des unités sédimentaires tabulaires, bien délimitées dans tout le bassin par Mouhri et al. (2013) grâce à de vastes campagnes de relevés géologiques et géophysiques, comprenant notamment des tomographies de résistivité électrique, des sondages électriques, des sondages TDEM et des carottages. Deux campagnes d'acquisition ont été menées sur une zone de plateau dans la partie sud-est du bassin sous deux conditions hydrologiques distinctes, successivement en période de hautes eaux (HW) et des basses eaux (LW).

Un espacement inter-trace de 0,5 m a permis d'obtenir un profil de 35,5 m de long. Deux tirs ont été réalisés de part et d'autre du profil, situés à un demi écartement inter-trace de la première et de la dernière trace. L'analyse combinée des temps de première arrivée des ondes P et des données de dispersion des ondes de surface a permis l'estimation 1D des coefficients de Poisson ν (Figure 1), directement à partir des rapports V_p/V_s dans les couches superficielles du système aquifère étudié sur le site de l'Orgeval. Les résultats obtenus ont confirmé la relation entre ν et le niveau de la nappe phréatique (Pasquet et al., 2015). En effet, on a pu observer un contraste de coefficient de Poisson qui ne correspondait à aucune interface géologique identifiée. En outre, les valeurs de ν observées de part et d'autre de l'interface étaient représentatives d'une transition entre les zones saturées et non-saturées. Il a ainsi été possible de détecter le niveau de la nappe phréatique dans différentes conditions hydrologiques dans un système aquifère multi-couches latéralement continu.

III. APPLICATION EN AQUIFÈRE DE SOCLE

La méthodologie a ensuite été mise en œuvre sur le site de l'observatoire hydrologique de Plœmeur (sud de la Bretagne, France) dans un contexte d'aquifère fracturé présentant de fortes discontinuités et variations latérales de lithologie en surface et en profondeur. L'aquifère de socle présent dans la zone est composé d'unités tectoniques formées au cours de l'orogénèse hercynienne qui sont marquées par de nombreuses intrusions syn-cinématique de leucogranites datant du Carbonifère supérieur (Ruelleu et al., 2010). Le site se situe à l'intersection : (i) d'un contact entre granites et micaschistes, et (ii) d'une zone de faille subverticale, clairement mise en évidence par les résultats de l'ERT (Figure 2a). Ce contexte spécifique a permis la mise en place de forages particulièrement productifs et en fait un site d'étude privilégié pour le réseau d'observation des sites hydrogéologiques H+.

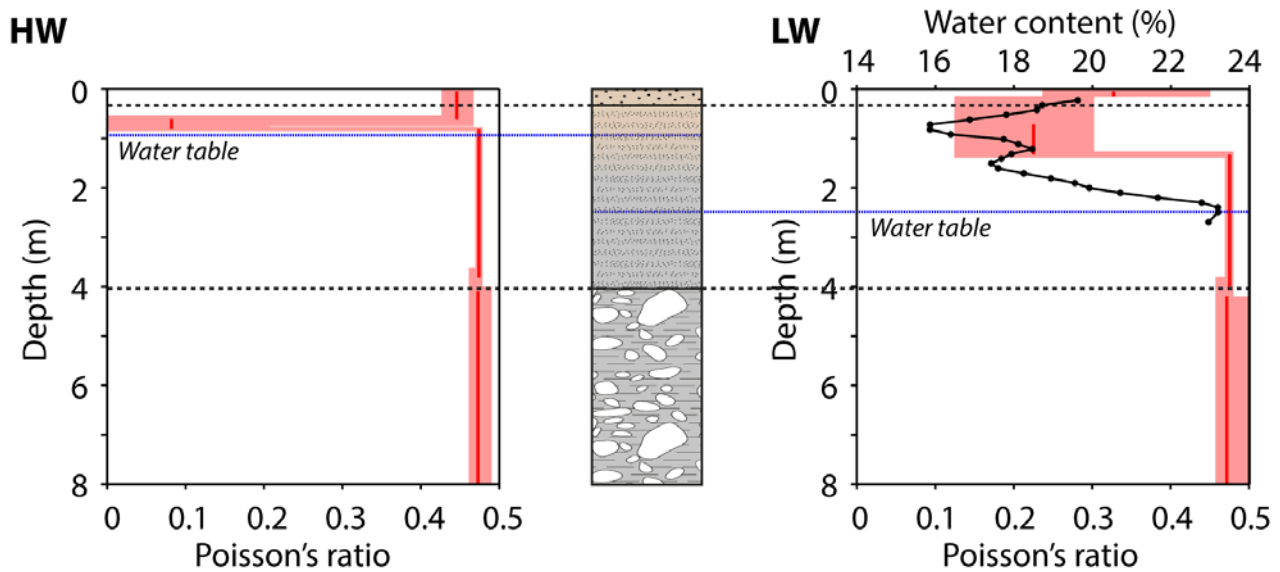


Figure 1 – Modèles 1D du coefficient de Poisson ν (lignes rouges) obtenus sur le site de l'Orgeval pendant les périodes de hautes eaux (HW) et de basses eaux (LW), avec les incertitudes correspondantes (enveloppe rouge). Les vitesses V_p ont été obtenues par l'interprétation des temps de première arrivée des ondes P et les vitesses V_s par inversion de la dispersion des ondes de surface. Les niveaux de nappe observés aux deux périodes sont représentés en pointillés bleus. Les limites lithologiques interprétées à partir de données de forage et de l'ERT sont représentées en pointillés noirs. Les mesures de teneur en eau réalisées sur des échantillons prélevés par sondage à la tarière durant la campagne LW sont superposées au coefficient de Poisson (trait noir).

Une campagne sismique a été réalisée le long du profil de l'ERT, en utilisant un espacement inter-trace de 4 m et 2 *roll-alongs*, pour finalement obtenir un profil de 476 m de long. Des tirs ont été réalisés entre chaque paire de géophones et aux deux extrémités du profil afin d'avoir une couverture suffisante pour effectuer parallèlement la tomographie en ondes P et le profilage en ondes de surface. La mise en œuvre de ces deux techniques a permis de construire une pseudo-section 2D du rapport V_p/V_s (Figure 2b) mettant clairement en évidence les variations latérales de lithologies observées précédemment sur les résultats d'ERT. Encore une fois, plusieurs contrastes observés localement sur la section du rapport V_p/V_s ont pu être reliés aux variations de teneur en eau superficielle et de niveau piézométrique observés dans des forages situés à proximité du profil d'acquisition (Pasquet et al., accepté).

IV. CONCLUSIONS

Les méthodes sismiques ont été proposées pour la caractérisation géophysique des systèmes aquifères. Une méthodologie spécifique a été développée pour exploiter de manière combinée et optimisée les ondes P et les ondes de surface présentes sur les enregistrements sismiques classiques. L'utilisation de cette méthodologie dans plusieurs contextes géologiques et hydrogéologiques a permis d'estimer des variations latérales et temporelles du rapport V_p/V_s en bon accord avec les informations géologiques *a priori* et les données géophysiques et piézométriques existantes. Des données *timelapse* sont actuellement en cours de traitement pour suivre les variations saisonnières du rapport V_p/V_s , et ainsi confirmer définitivement les méthodes sismiques comme un outil clé de l'hydrogéophysique.

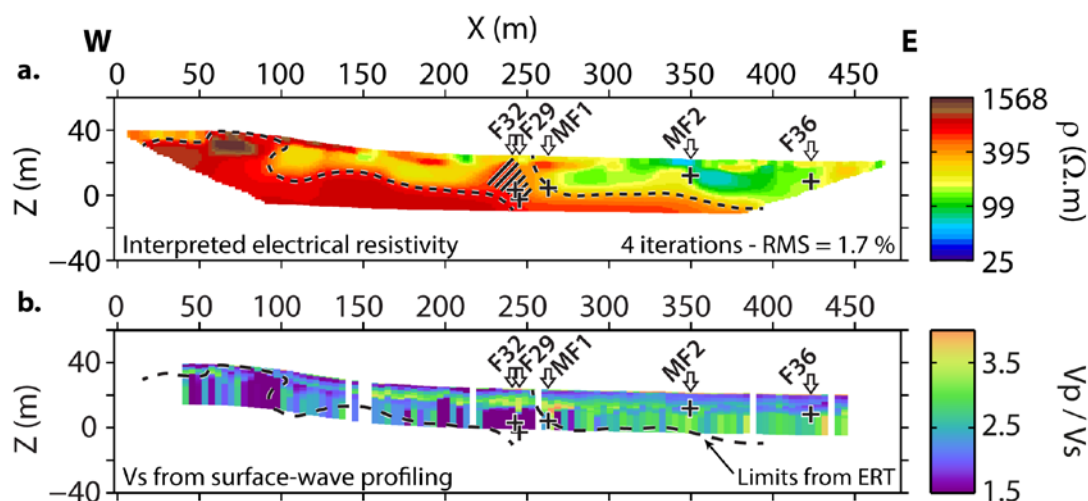


Figure 2 – (a) Tomographie de résistivité électrique (ERT) obtenue sur le site de Plœmeur. (b) Pseudo-section du rapport V_p/V_s obtenue sur le même profil en utilisant les vitesses V_p obtenues par tomographie de réfraction en ondes P et les vitesses V_s obtenues par profilage en ondes de surface. Les limites lithologiques interprétées à partir de l'ERT sont représentées en pointillés noirs. La zone hachurée correspond à la zone de contact possible entre les granites et micaschistes. Les positions des forages piézométriques sont représentées par des flèches blanches, les niveaux de nappe correspondant étant symbolisés par des croix noires.

Remerciements :

Ces travaux ont été financés par le programme EC2CO - BIOHEFFECT (projet « Études expérimentales multi-échelles de l'apport des vitesses sismiques à la description du continuum sol-aquifère ») et le projet ANR CRITEX ANR-11-EQPX-0011. Ils ont également été soutenus par le projet ONEMA NAPROM, la thématique « Interfaces Nappes-Rivières » du programme de recherche PIREN Seine, le GIS ORACLE (Observatoire de Recherche sur les bassins versants ruraux Aménagés, pour les Crues, Les Étiages et la qualité de l'eau), le réseau SOERE-H+ « Réseau National de sites hydrogéologiques » et le projet européen CLIMAWAT « Adapting to the Impacts of Climate Change on Groundwater Quantity and Quality ».

Références bibliographiques :

- Bergamo, P., D. Boiero, and L. V. Socco, 2012, Retrieving 2D structures from surface-wave data by means of space-varying spatial windowing: *Geophysics*, 77(4), EN39–EN51.
- Mouhri, A., Flipo, N., Rejiba, F., de Fouquet, C., Bodet, L., Kurtulus, B., Tallec, G., Durand, V., Jost, A., Ansart, P. and Goblet, P. (2013) Designing a multi-scale sampling system of stream–aquifer interfaces in a sedimentary basin. *Journal of Hydrology*, 504, 194-206.
- Pasquet, S., Bodet, L., Dhemaied, A., Mouhri, A., Vitale, Q., Rejiba, F., Flipo, N. and Guérin, R. (2015) 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*, 113, 38-50.
- Pasquet, S., Bodet, L., Longuevergne, L., Dhemaied, A., Camerlynck, C., Rejiba, F., Guérin, R. (accepté) 2D characterisation of near-surface V_p/V_s : surface-wave profiling versus refraction tomography. *Near Surface Geophysics*.
- Ruelleu, S., Moreau, F., Bour, O., Gapais, D. and Martelet, G. (2010) Impact of gently dipping discontinuities on basement aquifer recharge: An example from Plœmeur (Brittany, France). *Journal of Applied Geophysics*, 70(2), 161–168.
- Socco, L.V., Foti, S. and Boiero, D. (2010) Surface-wave analysis for building near-surface velocity models - Established approaches and new perspectives. *Geophysics*, 75(5), 75A83-75A102.