



Internal geophysics (Applied geophysics)

# Hydrogeophysics

## Hydrogéophysique

### Foreword

This special issue of the *Comptes Rendus Geoscience* is a collection of invited papers following three workshops on *hydrogeophysics* held in Autrans, France, 10–12 October 2007, Strasbourg, 18–20 January 2006, and Paris, 22 October 2004. These workshops were organised jointly by the *Institut de physique du globe de Strasbourg* (IPGS), the *Laboratoire des transferts et hydrologie de l'environnement de Grenoble* (LTHE) and the *Sisyphé* Laboratory (Structure and functioning of continental hydrosystems) at Paris 6 University (université Pierre et Marie Curie). The topic of these workshops was a discussion of the results of 'WaterScan', a three-year research project on hydrogeophysics sponsored by the French research organisation *Centre national de la recherche scientifique – Institut des sciences de l'univers* (CNRS-INSU), and by *Fond national pour la science* (FNS) within the programmes *ECosphere CONTinentale* and *Programme national de recherche en hydrologie* (ECCO-PNRH).

Due to the success of these workshops, it was decided that the best outcome of WaterScan would be to compile such recent results in hydrogeophysics in a special issue of a well-estimated peer-reviewed journal. The purpose was not only to make the results of WaterScan known to the general geophysical community, but also to include additional interesting results obtained by other groups and inform a wider community on the recent advances in hydrogeophysics. The "*Comptes Rendus Geoscience*" have agreed to publish this special issue given its long tradition to

### Avant-propos

Ce numéro spécial des *Comptes Rendus Geoscience* est une collection d'articles invités après trois séminaires sur l'hydrogéophysique, tenus en France à Autrans du 10 au 12 octobre 2007, à Strasbourg du 18 au 20 janvier 2006 et à Paris le 22 octobre 2004. Ces séminaires ont été organisés conjointement par l'*Institut de physique du globe de Strasbourg* (IPGS), le *Laboratoire des transferts et hydrogéologie de l'environnement de Grenoble* (LTHE) et le *Laboratoire Sisyphé* (Structure et fonctionnement des hydrosystèmes continentaux) à l'université Pierre-et-Marie-Curie Paris-6. L'objet de ces séminaires était une discussion des résultats de « WaterScan », un projet de recherches sur trois ans sur l'hydrogéophysique, soutenu par le CNRS – *Institut des sciences de l'univers* (INSU) et par le *Fond national pour la science* (FNS) dans le cadre des programmes *ECosphere continentale* et *Programme national de recherche en hydrologie* (ECCO-PNRH).

Vu le succès de ces séminaires, il a été décidé que la meilleure suite à donner à WaterScan serait une compilation de ces résultats récents en hydrogéophysique, dans un numéro spécial d'une publication prestigieuse revue par des pairs. Le but était, non seulement de faire connaître les résultats de WaterScan à la communauté géophysique, mais aussi d'y inclure d'autres résultats intéressants obtenus par d'autres groupes et d'informer une communauté plus étendue, des progrès récents en hydrogéophysique. Les « *Comptes Rendus Geoscience* » ont accepté de publier ce numéro spécial étant donné leur longue tradition d'interaction avec un

interact with a large spectrum of communities of the Earth, soil, hydrogeology, porous media and environmental sciences. All the invited papers are at the frontier of their specific discipline in geophysics; however, they also contain the necessary introduction, background material and perspectives for connecting together the different disciplines of the earth sciences.

*Hydrogeophysics* is a new term introduced by Hubbard and Rubin [15] to describe the use of advanced geophysical methods to understand the interaction between geology and fluid flow in the subsurface; however, the application of geophysics to hydrology is in fact not new: electrical soundings, for instance, have been used for many decades in aquifer prospecting, as well as magnetotelluric methods in geothermal energy research. Early developments were achieved in hydrogeophysics with the arrival of multi-electrode systems for Electrical Resistivity Imaging (ERI), for example to follow the infiltration of rain in soils, e.g. by Benderitter and Schott [3]. The characterization by geophysical methods of the properties of the subsurface (in particular, water flow) benefited from recent technical improvements (e.g. sensor and modelling/inversion), from better knowledge of transfer functions between geophysical properties and hydraulic parameters, and from the description of aquifers and aquitards (low-permeability strata) from the microscopic to the macroscopic scale.

The 16 papers in the volume are organized in six sections. *The first section introduces a wide spectrum of applications and methods* in hydrogeophysics; it shows several case-studies in different hydrogeological environments with contributions by *combined multi-methods*: Boucher et al. [5] study the recharge in an aquifer in a semi-arid climate, using electromagnetic mapping, ERI, resistivity logging, transient (i.e. time domain) electromagnetic sounding and magnetic resonance sounding (MRS); Guérin et al. [14] describe the detection of the position of karstic conduits, involving ERI, MRS, 'mise-à-la-masse' electrical mapping, and seismic tomography; Salliac et al. [20] study the vadose zone and a perched aquifer in a mountainous fractured environment using MRS, electrical direct current methods, audiomagnetotellurics and ground penetrating radar, and obtain 3-D views of the structure at different scales.

*The second section* contains two papers more precisely focused on the *application of dielectric methods*: Frangi et al. [10] introduce the theory,

large spectre de la communauté des sciences de la Terre, du sol, de l'hydrogéologie, des milieux poreux et de l'environnement. Tous les articles sollicités sont à la frontière de leurs disciplines spécifiques de la géophysique, mais contiennent également l'information nécessaire, les données de base et les perspectives futures, requises pour lier entre elles les différentes disciplines des sciences de la Terre.

*Hydrogéophysique* est un terme introduit par Hubbard et Rubin [15], pour décrire l'emploi de méthodes avancées de géophysique pour comprendre l'écoulement des fluides dans le sous-sol ; toutefois, l'application de la géophysique à l'hydrologie n'est, en fait, pas une nouveauté : les sondages électriques, par exemple, sont utilisés depuis des décennies dans l'exploration des aquifères, ainsi que les méthodes magnéto-telluriques dans la recherche d'énergie géothermique. Très tôt, des développements en hydrogéophysique ont été réalisés avec l'arrivée des systèmes multi-électrodes dans l'Imagerie de Résistivité Electrique (ERI en anglais) pour, par exemple, suivre l'infiltration de la pluie dans le sol par, entre autres, Benderitter et Schott [3]. La caractérisation, par les méthodes géophysiques, des propriétés du sous-sol superficiel (en particulier l'écoulement de l'eau) a tiré partie d'améliorations techniques récentes (par exemple, nouveaux capteurs, modélisation et inversion) d'une meilleure connaissance des fonctions de transfert entre les propriétés géophysiques et les paramètres hydrauliques et de la description des aquifères et des aquitards (couches de faible perméabilité) de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique.

Les 16 articles dans ce volume sont répartis en six parties. *La première partie introduit un large éventail d'applications et de méthodes* en hydrogéophysique ; elle fournit plusieurs cas d'étude dans des environnements hydrogéologiques divers, avec des contributions par des *multiméthodes combinées* : Boucher et al. [5] étudient la recharge d'un aquifère sous un climat semi-aride en se servant de cartographie électromagnétique, d'ERI, de profils de résistivité en forages, de sondages électromagnétiques transitoires (i.e. en domaine temporel) et de sondages de résonance magnétique protonique (RMP, MRS en Anglais) ; Guérin et al. [14] décrivent la détection de la position de conduits karstiques par l'utilisation de l'ERI, du sondage RMP, de la cartographie électrique par la « mise à la masse » et de la tomographie sismique ; Salliac et al. [20] ont étudié la zone vadose et un aquifère perché dans un environnement fracturé de montagne, en se servant de sondages RMP, de la méthode électrique à courant continu, de l'audio-magnéto-tellurique et d'un radar-sol

describe new instruments based either on the capacitive effect (at 1–20 MHz) or on the propagation of electromagnetic waves (at high frequencies of 0.1–4 GHz) to be used in the vadose zone in order to estimate the moisture content of soils by complex impedance measurements; Bano et al. [2] use ground penetrating radar to detect the infiltration of hydrocarbons in the soil and show numerical and laboratory simulations of infiltration experiments.

*The third section* contains four papers illustrating the value of *electric and electromagnetic methods for hydrogeophysics*: the latest development of monitoring experiments through time is shown by Cousin et al. [8] with illustrations of the hydraulic functioning of the upper soil, and the evolution of moisture content at the field scale; by Kuras et al. [17] with time-lapse ERI in laboratory experiments and in a real case application with cross-borehole tomography to monitor water level fluctuations and saline tracer movements; by Clément et al. [7] with an experiment on monitoring infiltration and recharge in Burkina-Faso; finally, Auken et al. [1] use a helicopter-borne transient electromagnetism method on a volcanic island in the Galapagos to obtain a quasi-3D resistivity mapping of the massif and the identification of its hydrogeological potential.

*The fourth section* contains two papers on MRS: Legchenko et al. [18] recall the theory and study the relationships between hydrogeologic parameters estimated with the MRS and electrical resistivity. Chalikakis et al. [6] study the dependence of MRS on hydrogeological properties in different geological environments.

*The fifth section* contains three papers showing three other types of *additional interesting methods in hydrogeophysics*: Jouniaux et al. [16] provide a review of the self-potential in hydrogeophysics with a classical target location and quantification of groundwater flow and new developments: biogeophysics (pollutant plume spreading), and estimates of pertinent hydraulic properties of aquifers; Grandjean et al. [13] consider seismics and their combination with the resistivity in the monitoring of infiltration inside a landslide; Tabbagh et al. [21] consider the monitoring of the ground temperature at different depths to assess the recharge over several years.

*The last section* contains two papers illustrating the application of downhole measurements in boreholes: Pézard et al. [19] measure the self-potential in order to identify several subsurface sources of natural electrical potential such as diffusion processes (membrane

et ils obtiennent des images en 3-D des structures à des échelles différentes.

*La deuxième partie* contient deux articles se concentrant plus particulièrement sur *l'application des méthodes diélectriques* : Frangi et al. [10] introduisent la théorie, décrivent de nouveaux instruments fondés, soit sur l'effet capacitif (à 1–20 MHz), soit sur la propagation d'ondes électromagnétiques (à hautes fréquences, 0,1–4 GHz), destinés à être employés dans la zone vadose, afin d'estimer le taux d'humidité des sols par mesure de l'impédance complexe ; Bano et al. [2] utilisent un radar-sol pour détecter l'infiltration d'hydrocarbures dans le sol et rendent compte de simulations numériques et d'expériences d'infiltration en laboratoire.

*La troisième partie* comporte quatre articles illustrant l'importance des *méthodes électriques et électromagnétiques* pour l'hydrogéophysique : les derniers développements dans le suivi temporel d'expériences sont décrits par Cousin et al. [8] avec des illustrations du fonctionnement hydraulique de la couche supérieure du sol et de l'évolution du taux d'humidité à l'échelle du terrain ; par Kuras et al. [17] avec l'ERI dans le temps, dans des expériences en laboratoire et des applications à des cas réels avec tomographie entre forages, afin de suivre les fluctuations du niveau d'eau et les mouvements de traceurs salins ; par Clément et al. [7] avec une expérience d'observation de l'infiltration et de la recharge d'un aquifère au Burkina Faso ; enfin, Auken et al. [1] utilisent une méthode électromagnétique transitoire héliportée sur une île volcanique dans l'archipel des Galápagos, afin d'obtenir une cartographie des résistivités du massif en quasi-3-D et l'identification de son potentiel hydrogéologique.

*La quatrième partie* présente deux articles sur les sondages RMP : Legchenko et al. [18] rappellent la théorie et étudient les relations entre les paramètres hydrologiques estimés par RMP et la résistivité électrique. Chalikakis et al. [6] examinent la dépendance des mesures RMP des propriétés hydrogéologiques dans des environnements géologiques divers.

*La cinquième partie* se compose de trois articles qui présentent trois autres types de *méthodes intéressantes en hydrogéophysique* : Jouniaux et al. [16] proposent une étude du potentiel spontané en hydrogéophysique, avec la localisation et la quantification de cibles classiques tel l'écoulement des eaux souterraines, ainsi que de nouveaux développements : la biogéophysique (propagation de panaches de polluants) et des estimations de propriétés hydrauliques pertinentes des aquifères ; Grandjean et al. [13] étudient la sismique et sa combinaison avec la résistivité dans les observations de l'infiltration à l'intérieur d'un glissement de terrain ;

potential in the presence of clays, Fickian processes due to pore fluid salinity gradients), or electrokinetic mechanisms with gradients in pore fluid pressure; Gouze et al. [12] present a new testing equipment to perform Single-Well Injection-Withdrawal (SWIW) tracer tests using a new dual-packer probe and including a high-resolution optical sensor for measuring in situ tracer concentrations.

Some other hydrogeophysical techniques with promising application perspectives are, however, not presented in this issue. This is the case of Spectral Induced Polarization (SIP), e.g. Ghorbani et al. [11] which is a tool adapted to follow water flow and contaminant plume migration, and also seismo-electrics and seismo-magnetics, e.g. Dupuis et al. [9] and Bordes et al. [4] which are expected to allow high resolution imaging of the vadose zone and the water-table. Other special issues on *hydrogeophysics* published in recent years are also recommended, e.g. in the *Journal of Hydrology* [vol. 267, 2002], in the *Vadose Zone Journal* [vol. 3, 2004], in *Near Surface Geophysics* [to appear in 2010] and in *Geophysics* [to appear in 2010].

The guest editors would like to thank the authors, reviewers, and the professional English corrector; they also acknowledge the support of the CNRS-INSU-SIC (surfaces et interfaces continentales) and thank the French Academy of Sciences for accepting this special issue in the *Comptes Rendus Geoscience*.

Esteben Auken<sup>a</sup>

Roger Guérin<sup>b</sup>

Ghislain de Marsily<sup>b,\*</sup>

Pascal Sailhac<sup>c</sup>

<sup>a</sup>*HydroGeophysics Group, Department of Earth Sciences, University of Aarhus, Høegh-Gulbergs gade 2, 8000 Århus, Denmark*

<sup>b</sup>*CNRS, UMR 7619-Sisyphé, université Pierre-et-Marie-Curie Paris-6, case 105, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France*

<sup>c</sup>*Institut de physique du globe de Strasbourg, UMR 7516, CNRS, EOST, université de Strasbourg, 5, rue René-Descartes, 67084 Strasbourg cedex, France*

\*Corresponding author.

E-mail addresses: [esben.auken@geo.au.dk](mailto:esben.auken@geo.au.dk)

(Esteben Auken)

[roger.guerin@upmc.fr](mailto:roger.guerin@upmc.fr) (Roger Guérin)

[GDemarsily@aol.com](mailto:GDemarsily@aol.com) (Ghislain de Marsily)

[pascal.sailhac@eost.u-strasbg.fr](mailto:pascal.sailhac@eost.u-strasbg.fr) (Pascal Sailhac).

Tabbagh et al. [21] examinent des enregistrements de la température du sol à différentes profondeurs, pour évaluer la recharge des aquifères sur plusieurs années.

*La dernière partie* comprend deux articles qui illustrent des applications de mesures en forages : Pézard et al. [19] mesurent le potentiel spontané, afin d'identifier plusieurs sources de potentiel électrique naturel dans le sous-sol comme, par exemple, des processus de diffusion (potentiel de membrane en présence d'argiles, processus Fickiens dus à des gradients de salinité dans les fluides contenus dans les pores) ou des mécanismes électrocinétiques avec des gradients de pression de fluides dans les pores ; Gouze et al. [12] présentent un équipement nouveau pour faire des essais de traçage avec la méthode du puits unique en injection-extraction en utilisant une nouvelle sonde à double-packer, qui comprend une sonde optique haute définition pour mesurer des concentrations de traceurs in situ.

D'autres techniques hydrogéophysiques avec des perspectives d'applications prometteuses ne sont, cependant, pas décrites dans ce numéro. C'est le cas, par exemple, de la polarisation provoquée spectrale (Spectral Induced Polarisation, SIP en anglais, voir Ghorbani et al. [11]), qui est un outil adapté au suivi des écoulements d'eau et de la migration d'un panache de polluants. C'est aussi le cas des méthodes sismo-électrique et sismo-magnétique, voir par exemple Dupuis et al. [9] et Bordes et al. [4], qui devraient permettre une imagerie de haute résolution de la zone vadose et du niveau de la nappe. D'autres numéros spéciaux sur l'hydrogéophysique publiés ces dernières années sont aussi recommandés, par exemple *Journal of Hydrology* [vol. 267, 2002], *Vadose Zone Journal* [vol. 3, 2004], *Near Surface Geophysics* [à paraître en 2010] et *Geophysics* [à paraître en 2010].

Les éditeurs invités voudraient remercier les auteurs et les rapporteurs ; ils remercient aussi le CNRS-INSU-SIC (Surface et Interfaces Continentales) de son soutien et sont reconnaissants à l'Académie des Sciences d'avoir accepté ce numéro spécial dans les *Comptes Rendus Geoscience*.

Esteben Auken<sup>a</sup>

Roger Guérin<sup>b</sup>

Ghislain de Marsily<sup>b,\*</sup>

Pascal Sailhac<sup>c</sup>

<sup>a</sup>*HydroGeophysics Group, Department of Earth Sciences, University of Aarhus, Høegh-Gulbergs gade 2, 8000 Århus, Denmark*

<sup>b</sup>*CNRS, UMR 7619-Sisyphé, université Pierre-et-Marie-Curie Paris-6, case 105, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France*

<sup>c</sup>*Institut de physique du globe de Strasbourg,*

UMR 7516, CNRS, EOSt, université de Strasbourg,  
5, rue René-Descartes, 67084 Strasbourg cedex,  
France

\*Auteur correspondant.

Adresses e-mail : esben.auken@geo.au.dk  
(Esteben Auken)  
roger.guerin@upmc.fr (Roger Guérin)  
GDemarsily@aol.com (Ghislain de Marsily)  
pascal.sailhac@eost.u-strasbg.fr (Pascal Sailhac).

## References

- [1] E. Auken, S. Violette, N. d'Ozouville, B. Deffontaines, K. Sorensen, A. Viezzoli, G. de Marsily, An integrated study of the hydrogeology of volcanic islands using airborne transient electromagnetic: Application in the Galapagos Archipelago, C. R. Geoscience 341 (2009) 899–907.
- [2] M. Bano, O. Loeffler, J.-F. Girard, Ground penetrating radar imaging and time-domain modelling of the infiltration of diesel fuel in a sand-box experiment, C. R. Geoscience 341 (2009) 846–858.
- [3] Y. Benderitter, J.J. Schott, Short time variation of the resistivity in an unsaturated soil: the relationship with rainfall, Eur. J. Environ. Eng. Geophys. 4–1 (1999) 37–49.
- [4] C. Bordes, L. Jouniaux, S. Garambois, M. Dietrich, J.P. Pozzi, S. Gaffet, Evidence of the theoretically predicted seismo-magnetic conversion, Geophys. J. Int. 174 (2008) 489–504.
- [5] M. Boucher, G. Favreau, M. Descloitres, J.-M. Vouillamoz, S. Massuel, Y. Nazoumou, B. Cappelaere, A. Legchenko, Contribution of geophysical surveys to groundwater modelling of a porous aquifer in semiarid Niger: an overview, C. R. Geosci. 341 (2009) 800–809.
- [6] K. Chalikakis, M.R. Nielsen, A. Legchenko, T.F. Hagensen, Investigation of sedimentary aquifers in Denmark using the magnetic resonance sounding method (MRS), C. R. Geoscience 341 (2009) 918–927.
- [7] R. Clément, M. Descloitres, T. Günther, O. Ribolzi, A. Legchenko, Influence of shallow infiltration on time-lapse ERT. Experience of advanced interpretation, C. R. Geoscience 341 (2009) 886–898.
- [8] I. Cousin, A. Besson, H. Bourennane, C. Pasquier, B. Nicoulaud, D. King, G. Richard, From spatial-continuous electrical resistivity measurements to the soil hydraulic functioning at the field scale, C. R. Geoscience 341 (2009) 859–867.
- [9] J.C. Dupuis, K.E. Butler, A.W. Kepic, Seismoelectric imaging of the vadose zone of a sand aquifer, Geophysics 72 (2007) A81–A85. , doi:10.1190/1.2773780.
- [10] J.-P. Frangi, D.-C. Richard, X. Chavanne, I. Bexi, New *in-situ* techniques for the estimation of the dielectric properties and moisture content of soils, C. R. Geoscience 341 (2009) 831–845.
- [11] A. Ghorbani, P. Cosenza, S. Ruy, C. Doussan, N. Florsch, Non-invasive monitoring of water infiltration in a silty clay loam soil using Spectral Induced Polarization, Water Resour. Res 44 (2008) W08402, doi:10.1029/2007WR006114.
- [12] P. Gouze, R. Leprovost, T. Poidras, T. Le Borgne, G. Lods, P. Pézard, CoFIS and TELog: new downhole tools for characterizing dispersion processes in aquifers by single-well injection-withdrawal tracer tests, C. R. Geoscience 341 (2009) 965–975.
- [13] G. Grandjean, C. Hibert, F. Mathieu, E. Garel, J.-P. Malet, Monitoring water flows in a clay-shale hillslope from geophysical data fusion based on a fuzzy logic approach, C. R. Geoscience 341 (2009) 937–948.
- [14] R. Guérin, J.-M. Baltassat, M. Boucher, K. Chalikakis, P.-Y. Galibert, J.-F. Girard, V. Plagnes, R. Valois, Geophysical characterisation of karstic networks - Application to the Ouyse system (Poumeyssen, France), C. R. Geoscience 341 (2009) 810–817.
- [15] S. Hubbard, Y. Rubin, Hydrogeophysics: state of the discipline, EOS 83–51 (2002) 602–606.
- [16] L. Jouniaux, A. Mainault, V. Naudet, M. Pessel, P. Sailhac, Review of Self-potential methods in Hydrogeophysics, C. R. Geoscience 341 (2009) 928–936.
- [17] O. Kuras, J.D. Pritchard, P.I. Meldrum, J.E. Chambers, P.B. Wilkinson, R.D. Ogilvy, G.P. Wealthall, Monitoring hydraulic processes with Automated time-Lapse Electrical Resistivity Tomography (ALERT), C. R. Geoscience 341 (2009) 868–885.
- [18] A. Legchenko, M. Ezersky, C. Camerlynck, A. Al-Zoubi, K. Chalikakis, Joint use of TEM and MRS methods in complex geological setting, C. R. Geoscience 341 (2009) 908–917.
- [19] P.A. Pézard, S. Gautier, T. Le Borgne, B. Legros, J.-C. Deltombe, MuSET: a multiparameter and high precision sensor for downhole spontaneous electrical potential measurements, C. R. Geoscience 341 (2009) 957–964.
- [20] P. Sailhac, M. Bano, M. Behaegel, J.-F. Girard, E. Falg s Para, J. Ledo, G. Marquis, P.-D. Matthey, J. Ortega-Ramírez, Characterizing the vadose zone and a perched aquifer near the Vosges ridge at the La Soutte experimental site, Obernai, France, C. R. Geoscience 341 (2009) 818–830.
- [21] A. Tabbagh, R. Guérin, H. Bendjoudi, B. Cheviron, M.-A. Bechkit, Pluri-annual recharge assessment using vertical soil temperature profiles: example of the Seine river basin (1984–2001), C. R. Geoscience 341 (2009) 949–956.