

---

Laboratoires d'accueil / Host laboratories :  
**Université Gustave Eiffel, Campus de Nantes**  
**GERS – GeoEND**  
Allée des Ponts et Chaussées, CS5004  
44 344 Bouguenais Cedex  
<https://geoend.univ-gustave-eiffel.fr/>

**Ecole Centrale de Nantes**  
**LS2N – SIMS**  
1 rue de la Noë  
44321 Nantes Cedex 3  
<https://www.ls2n.fr/>

---

**Ecole doctorale 3MG « Matière, Molécules, Matériaux et Géosciences »**

Equipe d'encadrement / Supervising team :

Directrice de thèse :  
Donatienne LEPAROUX

Tél. : 02 40 84 56 69  
[donatienne.leparoux@univ-eiffel.fr](mailto:donatienne.leparoux@univ-eiffel.fr)

Co-directeur de thèse :  
Sébastien BOURGUIGNON

Tél. : 02 40 37 69 15  
[sebastien.bourguignon@ec-nantes.fr](mailto:sebastien.bourguignon@ec-nantes.fr)

Co-encadrant :  
Sérgio PALMA LOPES

Tél : 02 40 84 59 12  
[sergio.palma-lobes@univ-eiffel.fr](mailto:sergio.palma-lobes@univ-eiffel.fr)

---

**Méthodologie d'imagerie par combinaison d'information sismique ondes de surface et géoélectrique à courant continu - Application à l'environnement urbain en contexte de changement climatique**

---

En contexte de changement climatique, la partie la plus superficielle du sous-sol, zone dite critique, est affectée par la récurrence d'événements météorologiques soudains, par l'alternance de sécheresses et de fortes pluies. Ces phénomènes conduisent à des variations rapides des niveaux des nappes superficielles et des profils hydriques des zones non saturées, engendrant une modification des propriétés mécaniques du sous-sol et une vulnérabilité accrue aux inondations. Il est donc crucial de suivre l'état de la proche surface pour permettre l'adaptation des zones urbaines anthropisées au changement climatique.

Les techniques géophysiques permettent un zonage spatial des paramètres physiques du milieu avec la profondeur, en particulier dans les environnements urbains, de complexité accrue par leur structure hétérogène et composée de milieux fortement remaniés au cours de l'anthropocène (Liu and Chan, 2007). Parmi elles, les techniques géoélectriques à courant continu (CC, e.g. Loke et al., 2013) sont reconnues pour informer sur la teneur en eau et la position du niveau de saturation. En parallèle, le monitoring sismique est en plein essor pour l'évaluation du niveau des nappes phréatiques et de la teneur en eau du sous-sol à l'échelle de bassins versants ou de rétention d'eau (Gaubert-Bastide et al., 2022). Ces approches de monitoring sismique visent à détecter des variations temporelles relatives des paramètres du sous-sol à partir de mesures acquises sur de longues périodes. Cependant, les besoins d'en estimer des valeurs absolues et d'en connaître les variations spatiales à un instant donné révèlent la nécessité d'une approche d'imagerie finement résolue. Or, la fiabilité des processus d'imagerie pour chacune des deux méthodes est assez limitée. Différentes études ont montré la complémentarité des paramètres sismiques (vitesses de propagation) et géoélectriques (résistivité) pour la caractérisation de structures géologiques, conduisant à des stratégies d'inversion jointe ou de fusion de données (Dezert et al., 2022). La plupart de ces propositions s'appuie, en sismique, sur la tomographie des temps de première arrivée (ondes de volume, e.g. Colombo and Rovetta, 2018). Or, en milieu urbain, très atténuant pour les ondes de volume, la sismique par ondes de surface (OS) est requise. Les rares approches combinant données sismiques OS et géoélectriques CC montrent un potentiel prometteur mais s'appuient sur la combinaison des résultats d'imagerie et non sur la combinaison des données (e.g. Coulouma et al., 2012 ; Coulouma et al., 2013).

Dans ce cadre, cette thèse propose de développer une méthodologie d'imagerie fine, basée sur l'inversion d'observables sismiques OS et géoélectriques CC, pour caractériser les niveaux de saturation en environnement urbain. Les outils d'imagerie innovants mis au point pour l'inversion en résistivité comme en ondes de surface seront exploités (Wang et al. 2021, Pageot et al. 2018) pour la reconstruction de coupes 2D de la subsurface. Afin de pallier la difficulté à relier directement (physiquement) les deux paramètres à une grandeur pétrophysique commune, un double processus d'imagerie est envisagé (vitesse sismique et résistivité électrique) dans une approche d'inversion collaborative, favorisant une structure spatiale commune entre les images 2D. La démarche scientifique mettra en œuvre une **double approche numérique et expérimentale**.

Dans un premier temps, le **problème 1D** sera considéré (milieu tabulaire) afin d'identifier les leviers issus des deux sources géophysiques permettant de contraindre au mieux le processus d'inversion. Dans le cas 1D, les solutions

2025-2028

analytiques aux problèmes directs permettent des calculs rapides et précis. Cette étude sera d'abord menée numériquement pour évaluer les signatures géophysiques de différents profils hydriques plausibles au sein de coupes lithologiques simplifiées. Il s'agira de résoudre les problèmes directs de sismique OS et géoélectrique CC séparément, mais sur des modèles hydro-géologiques analogues. Cette analyse permettra de caractériser **les sensibilités des observables géophysiques et leur complémentarité**, pour explorer la reconstruction collaborative des coupes géophysiques 1D (vitesse sismique et résistivité électrique) corrélées spatialement. Parallèlement, une validation expérimentale sera menée sur des modèles à échelle réduite en laboratoire (Dezert et al., 2019 ; Pageot et al., 2017). Le principal verrou sera ici la conception d'un modèle expérimental commun aux deux modalités, ou de deux modèles séparés mais « analogues » en termes de structure interne et de profil hydrique.

La thèse abordera ensuite **l'imagerie 2D**, c'est à dire de milieux dont les propriétés varient dans un plan vertical donné (plan de coupe). Les milieux seront d'abord étudiés par simulation numérique. Ils intégreront des spécificités propres aux environnements urbains (forts contrastes, alternances de vitesses sismiques élevées et basses) à des échelles métriques à décamétriques. La reconstruction simultanée des images de vitesse sismique et de résistivité électrique sera formulée comme un problème d'optimisation conjoint en ces deux quantités, que l'on cherchera à corréliser. Contrairement au cas 1D, les problèmes directs n'admettent plus de solution analytique. Il s'agira d'employer des outils de résolution numérique propres à chacun (résolution spatiale, schéma de discrétisation, complexité spécifiques). Une fonction de coût mesurant l'erreur entre les prédictions des problèmes directs et les mesures sera définie, exploitant l'expérience acquise sur le problème 1D en considérant les sensibilités des deux observables en fonction du milieu. Afin de coupler les problèmes, un terme de régularisation sera introduit permettant de favoriser des structures spatiales communes aux deux images : pénalité "edge-preserving" (Rudin et al., 1992) sous une forme conjointe, ou encore pénalité de structure (Doetsch et al., 2010). Une alternative envisagera la reconstruction des vitesses sismiques guidée par la reconstruction préalable des résistivités (ou l'inverse), ou encore un processus itératif de mise à jour des deux images. Les problèmes directs étant issus de solveurs numériques, rendant numériquement coûteuse l'évaluation du gradient de la fonction objectif, l'optimisation sera mise en œuvre par des techniques d'optimisation sans dérivée (Audet et al., 2016).

Ces développements seront également prolongés par un **travail expérimental sur des modèles réduits dédiés**, communs aux deux modalités géophysiques ou analogues, et intégrant des éléments structurels représentatifs d'un environnement urbain. Selon l'avancement de la thèse, une première évaluation sur des données acquises sur un site urbain réel pourra être envisagée.

---

**Mots-clés :** Imagerie géophysique, Sismique Ondes de Surface, Résistivité électrique, Inversion collaborative, Environnement urbain, Profil hydrique du sol

---

**Profil recherché :**

Connaissances théoriques : géophysique de subsurface, modélisation numérique, problèmes inverses.

Expérience pratique : expérimentation au laboratoire, programmation scientifique.

Compétences transversales : ouverture d'esprit, rigueur, organisation, travail en équipe, anglais scientifique.

---

**Candidatures:** Les candidat·e·s devront **impérativement** (et uniquement) déposer leur dossier de candidature sur le portail dédié ([https://www.ifsttar.fr/offres-theses/sujet.php?num=4104&num\\_session=1](https://www.ifsttar.fr/offres-theses/sujet.php?num=4104&num_session=1)) dès que possible et avant le **11/04/2025**.

2025-2028

---

**Imaging methodology combining seismic surface waves and DC-goelectrical information – Application to the urban environment in the context of climate change**

---

In the context of climate change, the most superficial part of the subsoil, the so-called critical zone, is affected by the recurrence of sudden meteorological events, by the alternation of droughts and heavy rains. These phenomena lead to rapid variations in the levels of surface water tables and the water profiles of unsaturated zones, causing changes in the mechanical properties of the subsoil and increased vulnerability to flooding. Monitoring the state of the near surface is therefore crucial to enable the adaptation of anthropized urban areas to climate change.

Geophysical techniques allow spatial zoning of the physical parameters of the medium with depth, particularly in urban environments, which are more complex due to their heterogeneous structure, and being composed of media that have been heavily reworked during the Anthropocene (Liu and Chan, 2007). Among them, direct current (DC) goelectric techniques (e.g. Loke et al., 2013) are acknowledged for providing information on water content and on the position of the saturation level. In parallel, seismic monitoring is booming for the assessment of groundwater levels and subsoil water content at the scale of watersheds or water retention areas (Gaubert-Bastide et al., 2022). These approaches aim to identify relative time variations in subsoil parameters from measurements acquired over long periods. However, the need to estimate absolute values and to infer their spatial variations at a given time reveals the necessity for a finely resolved imaging approach. However, the reliability of the imaging processes for each of the two methods is quite limited. Different studies have shown the complementarity of seismic (propagation speeds) and goelectric (resistivity) parameters for the characterization of geological structures, leading to joint inversion or data fusion strategies (Dezert et al., 2022). Most of these works are based, in seismics, on first arrival time tomography (body waves, e.g. Colombo and Rovetta, 2018). However, in urban environments, which are highly attenuating for body waves, surface waves (SW) are required. The few approaches combining SW seismic and DC goelectrical data show promising potential but rely on the combination of imaging results and not on the combination of data (e.g. Coulouma et al., 2012; Coulouma et al., 2013).

In this context, this thesis proposes to build a fine imaging methodology, based on the inversion of SW seismic and DC goelectrical observables, to characterize saturation levels in urban environments. The innovative imaging tools developed for goelectrical and surface wave inversion will be used (Wang et al. 2021, Pageot et al. 2018) for the reconstruction of 2D sections of the subsurface. In order to overcome the difficulty of directly (physically) linking the two parameters to a common petrophysical quantity, a twofold imaging process (seismic velocity and electrical resistivity) is considered in a collaborative inversion approach, promoting a common spatial structure between the 2D images. The scientific approach will implement **a dual numerical and experimental approach**.

First, the **1D problem** (tabular subsoil) will be considered in order to identify the levers from the two geophysical sources that best constrain the inversion process. In the 1D case, analytical solutions to both forward problems allow for fast and accurate computations, for robust results that can then be used in 2D. This study will first be conducted numerically to evaluate the geophysical signatures of different plausible water profiles within simplified lithological sections. It will involve solving the forward SW seismic and DC goelectrical problems separately, but on analogous hydrogeological models. This analysis will characterize **the sensitivities of geophysical observables and their complementarity**, to explore the collaborative reconstruction of spatially correlated 1D geophysical sections (seismic velocity and electrical resistivity). In parallel, an experimental validation will be conducted on reduced-scale laboratory models (Dezert et al., 2019 ; Pageo et al., 2017). The main obstacle here will be the design of an experimental model common to both modalities, or of two separate but 'analogous' models in terms of internal structure and water profile.

The thesis will then address **2D imaging**, i.e., imaging media whose properties vary in a given vertical plane (section plane). The media studied, numerically simulated, will integrate specificity of urban environments (strong contrasts, alternations of high and low seismic velocities) at metric to decametric scales. The simultaneous reconstruction of seismic velocity and electrical resistivity images will be formulated as a joint optimization problem in these two quantities, which we will seek to correlate. Unlike the 1D case, forward problems no longer admit analytical solutions. Numerical resolution tools will be considered, specific to each problem (spatial resolution, discretization scheme, specific complexity). A cost function measuring the error between the predictions of forward problems and the measurements will be built, exploiting the experience acquired on the 1D problem by considering the sensitivities of the two observables as a function of the environment. A regularization term will be introduced in order to couple the problems by favoring spatial structures common to both images: 'edge-preserving' penalty (Rudin et al., 1992) in a joint form, or structure penalty (Doetsch et al., 2010). An alternative will consider the reconstruction of seismic velocities guided by the prior reconstruction of resistivities (or conversely), or an iterative

process alternately updating the two images. Since forward problems are obtained from numerical solvers, the evaluation of the gradient of the objective function becomes numerically expensive, therefore optimization will be performed by derivative-free optimization techniques (Audet et al., 2016).

These developments will also be extended by **experimental work on dedicated scale models**, common to both geophysical modalities or analogous, and integrating structural elements representative of an urban environment. Depending on the progress of the thesis, an evaluation of the methods on data acquired on a real urban site will be considered.

---

**Keywords:** Geophysical Imaging, Surface Wave Seismics, DC-Electrical Resistivity, Collaborative Inversion, Urban Environment, Soil Moisture Profile

---

**Profile required for the position :**

Theoretical knowledge: Subsurface geophysics, numerical modelling, inverse problems.

Practical experience: laboratory experiments, scientific programming.

Cross-disciplinary skills: open-mindedness, rigour, organisation, teamwork, scientific English.

---

**Applications:** Candidates **must submit their application on the dedicated portal** ([https://www.ifsttar.fr/offres-theses/sujet.php?num=4104&num\\_session=1](https://www.ifsttar.fr/offres-theses/sujet.php?num=4104&num_session=1)) as soon as possible and no later than **April 11, 2025**.

---

**Bibliographie / References**

- Audet, C., Kokkolaras, M. (2016). Blackbox and derivative-free optimization: theory, algorithms and applications. *Optim Eng* 17, 1–2 (2016).
- Colombo, D., Rovetta, D., 2018. Coupling strategies in multiparameter geophysical joint inversion. *Geophys. J. Int.* 215, 1171–1184.
- Coulouma, G., Samyn, K., Grandjean, G., Follain, S., & Lagacherie, P. (2012). Combining seismic and electric methods for predicting bedrock depth along a Mediterranean soil toposequence. *Geoderma*, 170, 39–47.
- Coulouma, G., Lagacherie, P., Samyn, K., & Grandjean, G. (2013). Comparisons of dry ERT, diachronic ERT and the spectral analysis of surface waves for estimating bedrock depth in various Mediterranean landscapes. *Geoderma*, 199, 128–134.
- Dezert, T., Palma Lopes, S., Fargier, Y., Côte, P. (2019). Combination of geophysical and geotechnical data using belief functions: Assessment with numerical and laboratory data. *J. Appl. Geophys.* 170, 103824.
- Dezert, T., Fargier, Y., Lopes, S.P., Guihard, V. (2022). Canal dike characterization by means of electrical resistivity, shear wave velocity and particle size data fusion. *J. Appl. Geophys.* 204, 104749.
- Doetsch, J., Linde, N., Coscia, I., Greenhalgh S.A., Green, A.G. (2010). Zonation for 3D aquifer characterization based on joint inversions of multimethod crosshole geophysical data. *Geophys.* 75: G53-G64. <https://doi.org/10.1190/1.3496476>
- Gaubert-Bastide, T., Garambois, S., Bordes, C., Voisin, C., Oxarango, L., Brito, D., Roux, P. (2022). High-Resolution Monitoring of Controlled Water Table Variations From Dense Seismic-Noise Acquisitions. *Water Resour. Res.* 58, e2021WR030680.
- Liu, L., Chan, L.S. (2007). Sustainable urban development and geophysics. *J. Geophys. Eng.* 4, 243–244.
- Loke, M.H., Chambers, J.E., Rucker, D.F., Kuras, O., Wilkinson, P.B. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *J. Appl. Geophys.* 95, 135–156.
- Pageot, D., Leparoux, D., Le Feuvre, M., Durand, O., Côte, P., & Capdeville, Y. (2017). Improving the seismic small-scale modelling by comparison with numerical methods. *Geophysical Journal International*, 211(1), 637–649.
- Pageot, D., Leparoux, D., Capdeville, Y., & Côte, P. (2018, September). Alternative Surface Wave Analysis Method for 2D Near-Surface imaging Using Particle Swarm Optimization. In 3rd Applied Shallow Marine Geophysics Conference with EAGE NSG, Porto, Portugal.
- Rudin, L.I., Osher, S., Fatemi, E. (1992). Nonlinear total variation based noise removal algorithms. *Physica D.* 60 (1–4): 259–268.
- Wang, A., Leparoux, D., Abraham, O., & Le Feuvre, M. (2021). Frequency derivative of Rayleigh wave phase velocity for fundamental mode dispersion inversion: parametric study and experimental application. *Geophysical Journal International*, 224(1), 649–668.
- Whiteley, J.S., Chambers, J.E., Uhlemann, S., Wilkinson, P.B., Kendall, J.M. (2019). Geophysical Monitoring of Moisture-Induced Landslides: A Review. *Rev. Geophys.*