



ED 398 Géosciences, Ressources Naturelles et Environnement

Proposition de sujet de thèse pour la rentrée universitaire 2021-2022

Funded PhD project (3 years) to start autumn 2021

1. Modalités d'encadrement / Location and team

Unité(s) de recherche au sein de laquelle le doctorat est réalisé / **Laboratory and research institute** : **Centre de Géosciences MINES ParisTech, 35 rue saint-Honoré, 77300 Fontainebleau** (directeur de l'unité/Head) : LAGNEAU, Vincent, Pr. MINES ParisTech

Directeur(s) de thèse (HDR) / **Supervisor** : **GESRET, Alexandrine, Maître assistant, MINES ParisTech**

Co-directeur de thèse (HDR) / **Co-supervisor** : **BODET, Ludovic, Maître de Conférences, Sorbonne Université**

Co-encadrant (non HDR) / **Co-supervisor** : **RIVIERE Agnès, Chargée de recherche, MINES ParisTech**

1. Titre / Title

Hydrogéophysique probabiliste pour une meilleure articulation des données géophysiques et modèles hydrogéologiques / **Probabilistic approach in hydrogeophysics to better articulate geophysical data with hydrogeological models**

2. Contacts scientifiques / Contacts

agnes.riviere@mines-paristech.fr; alexandrine.gesret@mines-paristech.fr; ludovic.bodet@sorbonne-universite.fr

3. Description du projet de thèse / Research project outline

Mots clés : hydrogéophysique ; propagation d'incertitudes ; données géophysiques ; modèles hydrodynamiques ; écoulements ; zone critique ; méthodes sismiques / **Keywords** : **hydrogeophysics; uncertainty propagation; geophysical data; hydrodynamic models; unsaturated flow; critical zone; seismic methods.**

Résumé / Abstract : Ce projet vise à comprendre l'hydrogéologie de la **zone critique** (ZC). La ZC s'étend du sommet de la végétation à la base des aquifères, avec une épaisseur très variable et une hétérogénéité très importante (cf. p.ex. www.ozcar-ri.org). L'importance stratégique de la ZC pour les ressources mondiales en eau, en nourriture et en sécurité énergétique est de plus en plus reconnue dans un contexte de changement climatique et de développement humain. L'obtention des composantes du cycle de l'eau reste un défi, à la fois en termes de précision et de fermeture du budget dans les flux d'échange à travers la ZC. La connaissance des propriétés hydrodynamiques de la ZC (perméabilité, porosité et paramètres dérivés) et la caractérisation de son contenu en eau (à l'état statique comme transitoire) sont indispensables à la compréhension des processus qu'elle renferme. La résolution, par exemple, des problèmes d'écoulements et de transports au sein des hydrosystèmes souffre (1) d'une connaissance limitée de l'hétérogénéité des milieux qui les constituent ; et (2) d'un accès local et éparse à des mesures directes pour calibrer les modèles. Les flux d'eau, de matière et d'énergie ne sont par conséquent estimés qu'avec des incertitudes élevées (que seules les méthodes de simulations stochastiques permettent de quantifier). L'**hydrogéophysique** est un des outils actuellement développés afin de limiter ces incertitudes et les « équi-finalités » (la non-unicité) qui affectent la modélisation hydrodynamique. Le développement de méthodes géophysiques innovantes d'une part et, d'approches intégrées combinant mesures hydrogéologiques, géophysiques et géotechniques d'autre part, ont permis d'améliorer la représentation spatiale et temporelle des paramètres physiques du milieu poreux et, en conséquence, une meilleure caractérisation de l'évolution des processus d'infiltrations et chemins préférentiels des écoulements au sein de la ZC. Cette articulation de données et méthodes forme un premier pas encourageant, mais des efforts doivent être fournis en termes de quantification des paramètres estimés, de leurs résolutions spatiales et temporelles et d'estimation des incertitudes associées. Ce projet de thèse prévoit notamment de profiter de bases de données existantes (géophysiques et hydrogéologiques, cf. p.ex. <http://hplus.ore.fr/en/>) et simulations associées pour : (1) Caractériser

la façon dont les incertitudes se propagent de la donnée géophysique (l'observation de terrain) vers les modèles qu'elle propose (selon les méthodes utilisées et dans différents contextes) avec, en particulier, le développement d'une approche d'inversion conjointe probabiliste ; (2) Questionner la considération de ces modèles géophysiques comme « entrées » des modèles hydrogéologiques, voire adapter ou réviser les problèmes directs géophysiques pour mieux répondre aux objectifs de la modélisation ; (3) Estimer la pertinence de l'information transportée et la propagation des incertitudes, des modèles géophysiques, vers les modèles hydrogéologiques afin d'obtenir, *in fine*, des calibrations plus fiables.

This project focuses on understanding the hydrogeology of the Critical Zone (CZ). This most heterogeneous and complex region of the Earth ranges from the vegetation top to the aquifer bottom, with a highly variable thickness (e.g., www.ozcar-ri.org). The strategic importance of the CZ for global water, food and energy security resources are increasingly recognized in a context of climate change and human development. Obtaining the components of the water cycle remains a challenge, both in terms of accuracy and budget closure in the exchange fluxes through the CZ. The knowledge of the CZ, its physical properties (hydraulic conductivity, porosity and associated parameter) and its water content dynamics (permanent and transient states) are essential to describe and simulate the bio-geochemical-physical processes involved. The resolution of flow and transport problems in the CZ suffers from (1) limited knowledge of the heterogeneities of its porous media; and (2) sparse and local direct observations to calibrate models. The water flow, matter and energy transport are therefore estimated with high uncertainties (which are quantified by stochastic methods). As a countermeasure, hydrogeophysics provides a suite of tools that limit these uncertainties and the equifinality (non-unicity of the parameters setup) affecting hydrogeological modeling. The development of innovative geophysical methods combined with hydrogeological and geotechnical measurements, have improved the spatial and temporal characterization of the physical parameters of the porous media and, consequently, the evolution of infiltration processes and preferential flow paths within the CZ. This articulation between data and methods is encouraging, but efforts should be made to improve the quantification and estimation of the spatial and temporal resolutions of the physical parameters and their associated uncertainties. This PhD project takes advantage of available databases (geophysical and hydrogeological, e.g. <http://hplus.ore.fr/en/>) and associated simulations to: (1) characterize how uncertainties propagate from geophysical data (field observation) to the models (according to the methods used and the contexts involved); (2) question the articulation between estimations derived from these geophysical models and the hydrogeological models parametrization; adapt or revise forward geophysical problems to better satisfy modeling objectives; (3) Estimate the relevance of the information transferred from geophysical models to hydrogeological models and the associated propagation of uncertainties in order to obtain more reliable calibrations.

Contexte et environnement scientifiques / Context and scientific environment : Ce sujet de thèse correspond à la poursuite d'une coopération active depuis 10 ans entre les équipes SHR à Mines ParisTech et l'équipe de géophysique appliquée de l'UMR METIS à Sorbonne Université, notamment à travers les thèses de S. Pasquet (EDGRNE 2011-2014, financement SU) et de M. Dangeard (EDGRNE 2015-2018, financement SU) et dans le cadre des programmes PIREN-Seine et CRITEX pour des applications aux réseaux d'observations (p.ex. H+) et infrastructures de recherche (p.ex. OZCAR). Les résultats et approches développées ont un rayonnement international (comme sur les observatoires de la zone critique aux USA ou bien dans le cadre du projet européen ITN ENIGMA avec la thèse de L. Blazevic soutenue en 2020). Des développements sont également en cours dans le cadre de coopérations industrielles. La thèse pourra bénéficier de soutiens de l'UMR METIS, de l'équipe géophysique associée H+ et de CRITEX/OZCAR pour les activités expérimentales éventuelles. Des coopérations sont envisagées avec des spécialistes de pétrophysique (METIS, U. Lausanne), de méthodes stochastiques (Géostat Mines ParisTech) ; de calculs parallèles (GET) et d'expérimentations hydrogéophysiques (Géosciences Rennes). / This PhD project corresponds to the continuation of an active cooperation for 10 years between the SHR team at Mines ParisTech and the applied geophysics team of the UMR METIS at Sorbonne Université, in particular through the PhD of S. Pasquet (EDGRNE 2011-2014, SU funding) and M. Dangeard (EDGRNE 2015-2018, SU funding) and within the framework of the PIREN-Seine and CRITEX programs, for applications to observatory networks (e.g. H+) and research infrastructures (e.g. OZCAR). The results and approaches have an international influence (on the critical zone observatories in the USA for instance, or in the framework of the european project ITN ENIGMA, with L. Blazevic PhD thesis defended in 2020). Developments are also currently in progress in the context of industrial collaborations. The PhD project will benefit from the support of the UMR METIS, the associated geophysics team of H+ and CRITEX/OZCAR for experimental activities. Collaborations are planned with specialists in petrophysics (METIS, U. Lausanne), stochastic methods (Géostat Mines ParisTech), numerical modeling and parallel computing (GET) and hydrogeophysical experiments (Géosciences Rennes).

Objectifs de valorisation / Publications, outreach : La thèse pourra faire l'objet de publications dans des revues telles que GJI, JGR, WRR, VZJ, JH. Les résultats seront présentés dans le cadre d'ateliers (réunions OZCAR ; H+) ; de colloques nationaux (GEOFCAN, AGAP, RST, IAH) et internationaux (EAGE, EGU, AGU). Les études contribueront aux développements des bases de données sur lesquelles elles reposent (cf. p.ex. H+, OZCAR). Les outils de traitements, codes et logiciels seront mis en forme pour être distribués sous licences libres. / *The PhD project will publish its results in journals such as GJI, JGR, WRR, VZJ, JH. It will be presented in workshops (OZCAR meetings, H+); national (GEOFCAN, AGAP, RST, IAH) and international (EAGE, EGU, AGU) conferences. The studies will contribute to the development of existing databases (e.g. H+, OZCAR). Processing tools, codes and softwares will be packaged for distribution under open source licenses.*

Compétences spécifiques de chaque encadrant / Scientific skills and role of each supervisor :

- A. Rivière, modélisation hydrodynamique : théorie, processus physiques au sein de la zone critique, conception et paramétrisation des codes et mise en application avec contraintes adaptées et issue de mesures de terrain dédiée / *hydrodynamic modeling: theory, physical processes within the critical zone, conceptualisation and parameterization of codes and implementation with adapted constraints and from dedicated field measurements;*
- L. Bodet, méthodes et imagerie géophysique : méthodologies, mesures de terrain, interprétation combinée de données géophysiques et géotechniques, traitement de l'information, propagation d'ondes et propriétés mécaniques des milieux / *geophysical methods/imaging, methodologies, field measurements, combined interpretation of geophysical and geotechnical data, information theory and signal processing, wave propagation and mechanical properties;*
- A. Gesret, inversion géophysique : problèmes inverses, approches probabilistes, estimation et propagation d'incertitudes / *inverse problems, probabilistic approaches, estimation and propagation of uncertainties.*

5. Candidat.e: compétences et connaissances requises / Candidate: prerequisite skills and knowledge

Les candidats doivent avoir obtenu ou être en cours d'obtention d'un master dans un domaine lié à la géophysique et/ou à l'hydrogéologie quantitative et/ou à l'ingénierie voire aux mathématiques appliquées. De bonnes bases en statistiques, probabilités, en mécanique et en propagation des ondes, voire en pétrophysique sont souhaitables. Une expérience dans l'analyse de données, du traitement de l'information (traitement du signal, problèmes inverses), dans l'utilisation de modélisations numériques, ainsi que dans la programmation (Fortran/C ; Python/Matlab) sera/seront avantageuse. Des capacités au travail d'équipe et de bonnes aptitudes à la communication sont essentielles. Des compétences en communication écrite et verbale en anglais sont requises. La durée d'un doctorat est très courte et il est également essentiel d'être capable de s'investir rapidement dans de nouveaux sujets (mobilité, autonomie). / *We are looking for highly motivated doctoral candidates to join our project dealing with hydrogeology and geophysics on a quantitative point of view. Candidates must have obtained or be in the process of obtaining a master's degree in a field related to geophysics and/or quantitative hydrogeology and/or engineering or even applied mathematics. A good background in statistics, probability, mechanics and wave propagation, or even petrophysics is/are desirable. Experience in data analysis, information processing (signal processing, inverse problems), numerical modeling, and programming (Fortran/C; Python/Matlab) will be advantageous. Teamwork and good communication skills are essential. Written and verbal communication skills in English are required. The duration of a PhD is very short: ability of quick familiarization with new topics and strong motivation to produce results are necessary (mobility, autonomy).*

6. How to apply?

Outstanding candidates should apply by email to agnes.riviere@mines-paristech.fr; alexandrine.gesret@mines-paristech.fr; ludovic.bodet@sorbonne-universite.fr with a letter of motivation, a curriculum vitae, full transcripts of Bachelor and Master studies and, at least, two references (with up to date contacts). Short-listed candidates will be interviewed.

NB, the candidate will be fully funded for 3 years (100% position). He/She will benefit from a dynamic working environment, with stimulating scientific support, state-of-the-art facilities and advanced computational modeling tools. The appointment will be given in accordance with the French labour laws. The applicant will benefit from additional resources to cover the purchase of equipment and consumables; possible data acquisition and analyses; travels for meetings and stays with cooperators; participation in conferences, workshops; summer schools; payment of publication/appraisal costs, etc.