



**SORBONNE
UNIVERSITÉ**



CERGY PARIS
UNIVERSITÉ



TERTIARY EDUCATION TRUST FUND

Avis de soutenance de thèse de

Elijah Edet NKITNAM

Propriétés aquifères par analyse des marées terrestres et barométriques: application au site archéologique gallo-romain à Genainville (Vexin français)

Soutenance prévue mardi 28 mai 2024 à 10h00

Lieu: Salle de conférence de l'UFR TEB (Tour 46 - 56, 2ème étage)
Sorbonne Université, Campus Pierre et Marie Curie
4 Place Jussieu 75005 Paris

Devant le jury composé de:

Mme Béatrice LEDÉSSERT, Professeure, CY Cergy Paris Université, Rapporteur
M. Frédéric DELAY, Professeur, Université de Strasbourg, Rapporteur
Mme Valérie PLAGNES, Professeure, Sorbonne Université, Examinatrice
Mme Audrey BONNELYE, Maître de conférences, Université de Lorraine, Examinatrice
M. Pascal SAILHAC, Professeur, Université Paris-Saclay, Examineur
M. Vivien BARRIÈRE, Maître de conférences, CY Cergy Paris Université, Invité
M. Jérôme WASSERMANN, Ingénieur de recherche, CY Cergy Paris Université, Encadrant de thèse
M. Alexis MAINEULT, Chargé de recherches CNRS, Sorbonne Université, Directeur de thèse

Résumé

Le bien-être des sociétés humaines nécessite la connaissance des impacts réciproques entre les activités anthropiques et les services écosystémiques. Afin d'atténuer les changements climatiques globaux, régionaux et locaux, il faut développer des méthodes et des techniques pour maintenir des interactions précieuses entre sociétés humaines et écosystèmes. Dans le contexte continental, les inondations sont souvent des événements brutaux et catastrophiques, altérant le bien-être des sociétés humaines pendant des périodes plus ou moins longues et menaçant également le patrimoine culturel.

La société gallo-romaine a développé des connaissances hydrauliques et des techniques de drainage, afin de tirer profit de l'environnement naturel et de développer ses activités. Néanmoins, ces techniques n'ont pas toujours été suffisantes pour atténuer les événements climatiques comme les inondations, ce qui a pu entraîner l'abandon de l'environnement occupé. De nos jours, la gestion des risques d'inondation reste une tâche difficile, en particulier concernant la prévision des inondations par les eaux souterraines, qui saturent ensuite les zones vadoses, entraînant des conséquences importantes sur les bâtis, présents ou passés.

L'étude de la dynamique de la nappe phréatique et de la saturation de la zone vadose est classiquement réalisée par des mesures hydrologiques dans des piézomètres. Les méthodes géophysiques permettent d'explorer une plus grande surface, mais avec une résolution qui dépend de la densité du réseau de capteurs.

Ce travail de thèse teste et combine différentes méthodes géophysiques sur un site pilote situé dans le Vexin français, à Genainville, site qui a été anthropisé pendant des milliers d'années. La durabilité de ce site archéologique gallo-romain, où des vestiges et des artefacts datés du 2ème siècle de notre ère ont été excavés, est menacée par la présence d'une nappe phréatique peu profonde. Les matériaux et les structures du patrimoine bâti, comprenant un temple à deux cellules et un amphithéâtre en calcaire, sont en effet soumis aux fluctuations du niveau de la nappe. Dans le cadre d'un effort multidisciplinaire visant à soutenir les recherches archéologiques et à conserver les structures du site, nous rapportons ici des résultats d'imagerie géophysique (sections de résistivité électrique) combinés au suivi hydrologique des eaux souterraines. L'analyse des chroniques hydrologiques temporelles a permis d'évaluer quantitativement les caractéristiques hydrauliques et géo-mécaniques de la subsurface selon une approche non destructive. Les niveaux des eaux souterraines dans trois piézomètres et les données de pression barométrique ont été acquis à des intervalles de 60 secondes. Ces

données continues ont été décomposées selon des techniques de traitement du signal.

En utilisant la méthode de déconvolution par régression, la réponse à la pression barométrique a été dissociée des niveaux d'eau mesurés. Les paramètres théoriques des marées terrestres ont été calculés à l'aide du code PyGtide, basé sur le programme ETERNA PREDICT. L'analyse harmonique des données brutes et filtrées, à l'aide de la transformée de Fourier rapide classique et de l'analyse spectrale singulière, identifie les composantes M_2 , S_2 , K_1 et O_1 de l'onde de marée comme étant les composantes dominantes du signal. Les constituants harmoniques K_1 et S_2 sont présents dans les ensembles de données filtrées et brutes avec des amplitudes différentes. La méthode de réponse à l'amplitude a été utilisée pour calculer les propriétés poro-élastiques de l'aquifère et caractériser l'hétérogénéité de la subsurface. Le modèle a identifié un aquifère semi-confiné comme principal système de stockage des eaux souterraines du site. La méthodologie développée semble être un outil prometteur pour surveiller les variations de saturation pendant les périodes saisonnières, afin de prévenir les risques d'inondation des nappes phréatiques peu profondes.

Mots-clés: Site patrimonial, matériaux culturels enfouis, fluctuations des eaux souterraines, tomographie de résistivité électrique 2D, structure du sous-sol, analyse de semblance basée sur les ondelettes, analyse en spectres singuliers, composantes harmoniques, variabilité des conditions climatiques et environnementales.

Aquifer properties from Earth and barometric tides analysis: application to the Gallo-Roman Archaeological Site of Genainville (French Vexin)

Abstract

The well-being of human societies requires knowledge of the reciprocal impacts between anthropogenic activities and ecosystem services. In order to mitigate global, regional and local climate change, methods and techniques must be developed to maintain valuable interactions between human societies and ecosystems. In the continental context, floods are often brutal and catastrophic events, altering the well-being of human societies for more or less long periods and also threatening cultural heritage.

Gallo-Roman society developed hydraulic knowledge and drainage techniques in order to take advantage of the natural environment and develop its activities. However, these techniques have not always been sufficient to mitigate climatic events such as flooding, which may have resulted in the abandonment of the occupied environment. Nowadays, flood risk management remains a difficult task, in particular concerning the prediction of flooding by groundwater, which then saturates the vadose zone, leading to significant consequences on buildings, present or past.

The study of the dynamics of the water table and the saturation of the vadose zone is classically carried out by hydrological measurements in piezometers. Geophysical methods make it possible to explore a larger area, but with a resolution that depends on the density of the sensor network.

This thesis work tests and combines different geophysical methods on a pilot site located in the French Vexin, in Genainville, a site which has been anthropized for thousands of years. The sustainability of this Gallo-Roman archaeological site, where remains and artefacts dating from the 2nd century AD were excavated, is threatened by the presence of a shallow water table. The materials and structures of the built heritage, including a two-cell temple and a limestone amphitheatre, are in fact subject to fluctuations in the water table. As part of a multidisciplinary effort to support archaeological research and conserve site structures, we report geophysical imaging results (electrical resistivity sections) combined with hydrological groundwater monitoring. The analysis of temporal hydrological chronicles made it possible to quantitatively evaluate the hydraulic and geo-mechanical characteristics of the subsurface using a non-destructive approach. Groundwater levels in three piezometers and barometric pressure data were acquired at 60-second intervals. These continuous data were decomposed using signal processing techniques.

Using the regression deconvolution method, the barometric pressure response was decoupled from the measured water levels. Theoretical parameters of Earth tides were calculated using the PyGtide code, based on the ETERNA PREDICT program. Harmonic analysis of raw and filtered data, using classical fast Fourier transform and singular spectrum analysis, identifies the M_2 , S_2 , K_1 and O_1 components of the tidal wave as the dominant components of the signal. The harmonic constituents K_1 and S_2 are present in the filtered and raw data sets with different amplitudes. The amplitude response method was used to calculate the poroelastic properties of the aquifer and characterize the heterogeneity of the subsurface. The model identified a semi-confined aquifer as the primary groundwater storage system at the site. The developed methodology appears to be a promising tool for monitoring saturation variations during seasonal periods, in order to prevent the risk of flooding of shallow water tables.

Key words: Heritage site, buried cultural materials, groundwater fluctuations, 2D electrical resistivity tomography, subsurface structure, wavelet-based semblance analysis, singular spectral analysis, harmonic components, variability in climatic and environmental conditions.