

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

SPÉCIALITÉ : MECANIQUE

Par Shan XU

**Caractérisation de l'environnement karstique de la grotte
de Lascaux par couplage de méthodes géophysique,
statistique et géostatistique**

Sous la direction de : Colette SIRIEIX

Soutenue le 24 Novembre 2015

Membres du jury :

M. GUERIN, Roger	Professeur, Université Paris 6	Rapporteur
M. PESSEL, Marc	Maître de conférences HDR, Université Paris Sud	Rapporteur
M. COSENZA, Philippe	Professeur, Université de Poitiers	Examineur
M. FERNANDEZ MARTINEZ, Juan Luis	Professeur, University of Oviedo, Spain	Examineur
M. MARACHE, Antoine	Maître de conférences, Université de Bordeaux	Examineur
Mme. RISS, Joëlle	Professeur Emérite, Université de Bordeaux	Examineur
Mme. SIRIEIX Colette	Professeur, Université de Bordeaux	Directeur
Mme. FERRIER, Catherine	Maître de conférences, Université de Bordeaux	Co-encadrante
M. RIEU, Alain	Conservateur, DRAC	Invité
M. MALAURENT, Philippe	Ingénieur d'études, Université de Bordeaux	Invité

Résumé

La grotte de Lascaux (inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO et l'une des plus connues au monde) nécessite, dans le cadre de sa conservation et suite aux aléas subis depuis sa découverte, une attention particulière tant pour elle-même que pour son environnement. L'utilisation d'une méthode géophysique, la Tomographie de Résistivité électrique (TRE) qui est une méthode non intrusive par excellence, est donc proposée pour la reconnaissance du milieu karstique l'entourant.

Un suivi temporel par TRE a été mis en œuvre pour caractériser l'amont hydraulique de la grotte et surveiller la variation temporelle de la résistivité des terrains. À l'aide d'analyses statistiques, et en couplant les données microclimatiques aux résultats d'un suivi temporel de vingt-deux mois, nous avons montré la capacité de ce type de mesures à caractériser l'environnement épikarstique de la grotte, particulièrement les zones d'alimentation et celles permettant l'infiltration des eaux pluviales. Une modélisation du débit d'un écoulement situé à l'entrée de la grotte est proposée à partir des données de résistivité dans la zone d'alimentation identifiée au cours du suivi. Ce modèle a la capacité de prédire les arrêts et les reprises des écoulements dans la grotte, éventuellement des événements journaliers.

À partir des données de résistivité issues d'une prospection 3D du site, des modélisations géostatistiques par krigeage ordinaire et par indicatrice ont été effectuées permettant des représentations spatiales en fonction de la résistivité des terrains. Ces modèles se sont révélés extrêmement instructifs par l'imagerie de l'environnement karstique de la grotte de Lascaux qui en a résulté. Les limites des formations détritiques et des calcaires sont identifiées à l'est et l'ouest du site. À l'intérieur des calcaires, on retrouve, bien sûr, les anomalies conductrices déjà identifiées au cours du suivi temporel mais aussi leur extension spatiale. Ainsi, on a pu mettre en évidence la continuité spatiale de certaines anomalies.

Le suivi temporel par TRE a permis la compréhension de la structure et du fonctionnement de l'alimentation de l'épikarst. Les modèles géostatistiques 3D ont montré leur efficacité pour la caractérisation de l'environnement de la grotte. Les résultats aideraient à proposer des conseils pour la protection du milieu entourant la grotte et ainsi pour la préservation de cette dernière.

Mots-clés : grotte de Lascaux, suivi temporel, Tomographie de Résistivité Électrique, analyse statistique, modélisation du débit, condition microclimatique, modélisation géostatistique, préservation

Abstract

The Lascaux Cave, one of the most important prehistoric caves in the world, located in Dordogne (24, France) needs particular attention both for itself and for the environment in terms of conservation and vulnerability since its discovery. Geophysical methods in particular Electrical Resistivity Tomography enable us, in a non-invasive way, to monitor the karstic environment.

A Time-Lapse monitoring by Electrical Resistivity Tomography (ERT) was carried out next to the cave. Together with analysis of the local effective rainfall (groundwater recharge) and the flow in the cave, the monitoring helped us to identify an area where upstream underground water is probably stored e.g. a recharge zone. There is a large electrical contrast between the surrounding limestone and the probable recharge zone. Then, a multivariate analysis through the resistivity values allowed us to characterize the model blocks, showing a specific behavior over time, especially the blocks with the lowest electrical resistivity. A prediction model of the flow in relation with the recharge zone succeeded to predict the beginning and the end of flow, even the daily event with extremely high value of flow.

In order to visualize the environment in 3D condition, a geostatistical modelling was then applied to the resistivity values. The geostatistical models can emphasize the limit between the limestone promontory and the clayey/sandy formations to the east/west part of the site. In the limestone promontory, the models also showed the possible connection between the anomalous conductive areas that may have a special consequence in this karstic environment.

The Time-Lapse monitoring by ERT allows us to understand the karstic structures and recharge phenomena. The 3D geostatistical modeling showed efficiency for the characterization of the cave environment. Those results can help to provide advices for the cave preservation.

Keywords: Lascaux Cave, Time-Lapse monitoring, Electrical resistivity tomography, statistical analysis, modeling of flow, microclimate conditions, geostatistical modeling, preservation