

Modélisation 3D du massif rocheux de la grotte de Lascaux: identification des Conduits Karstiques par Tomographie de Résistivité Electrique (TRE).

3D modelling of the Lascaux cave rock mass: identification of karst conduits using electrical resistivity tomography (ERT).

Habiba LHARTI¹, Colette SIRIEIX¹, Antoine MARACHE¹, Joëlle RISS¹, Cécile VERDET¹, Fabien SALMON¹, Delphine LACANETTE¹

¹ *Université de Bordeaux, CNRS, Arts et Métiers Institute of Technology, Bordeaux INP, INRAE, I2M Bordeaux, F-33400 Talence, France*

RÉSUMÉ – La circulation de l'eau dans un milieu karstique tel que celui de la grotte de Lascaux peut contribuer en partie à l'altération de ses parois ornées. Ainsi, la construction d'un modèle tridimensionnel simplifié englobant la totalité du massif basé sur l'utilisation de données géophysiques traitées par une méthode de classification et interpolées par krigeage, a permis de localiser des conduits karstiques. Ces derniers pourraient jouer un rôle non négligeable dans la propagation de la chaleur, dans l'infiltration d'eau dans la cavité, et le développement d'altérations.

ABSTRACT – The circulation of water in a karstic environment such as the Lascaux cave one, can partly contribute to the deterioration of its decorated walls. The construction of a simplified three-dimensional model covering the entire massif, based on geophysical data processed by a clustering method and interpolated by kriging, has made it possible to locate karstic conduits. These could play an important role in the heat transfer, the infiltration of water into the cavity, and the development of alterations.

1. Introduction

La préservation du patrimoine souterrain, tel que celui de la grotte de Lascaux qui abrite des peintures rupestres datant de 20 000 ans (Ducasse et Langlais 2019), nécessite une étude approfondie des transferts hydriques et thermiques dans le massif rocheux. En effet, il existe des facteurs susceptibles d'être à l'origine de l'altération des parois et des peintures, attribuable aux phénomènes de condensation-évaporation à la paroi dépendant de l'hétérogénéité géologique du massif karstique.

Cette étude propose une méthodologie combinant données géophysiques, méthodes statistiques et interpolation géostatistique pour élaborer un modèle tridimensionnel le plus proche possible de la réalité géologique du site et ouvrira la possibilité de modéliser les transferts thermiques dans le massif hétérogène.

La méthodologie appliquée débute par la segmentation numérique du massif à l'aide de la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA), basée sur les données de Tomographie de Résistivité Electrique (TRE 2D) acquises sur site durant la campagne de mesures réalisée sur site en 2013 (Sirieix et Xu 2014).

La construction du modèle 3D est ensuite réalisée par krigeage ordinaire après inversion des résistivités le long des profils 2D. Le modèle 3D de résistivités obtenu est ensuite segmenté sur la base des classes obtenues par CHA. Les résultats de cette étude ont permis d'avoir une vision globale du massif divisé en domaines géologiques les plus homogènes possibles et l'identification des zones propices à l'infiltration d'eau vers la cavité.

Nous présentons d'abord la campagne de mesures géophysiques effectuée sur le site. Par la suite, nous détaillons la méthodologie mise en œuvre pour élaborer le modèle 3D,

débutant par la présentation de la méthode de classification (CHA) adoptée. Enfin, nous approfondissons l'analyse des résultats provenant de l'interpolation par krigeage ordinaire.

2. Site d'étude et données

Située dans un environnement karstique non saturé, la grotte de Lascaux constitue un site d'importance historique, inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO en 1963. La tomographie de résistivité électrique (TRE), en tant que méthode non destructive, facilite les prospections visant à déterminer les valeurs de résistivité électrique du massif à partir de mesures effectuées en surface. Une campagne de mesures menée en 2013 par Sirieix et Xu (2014) avait pour objectif la caractérisation de tout le massif environnant la cavité.

Les 20 profils de TRE, réalisés entre le 21 et le 28 mars 2013 dans des conditions climatiques stables, ont été réalisés au moyen d'un résistivimètre SYSCAL PRO Switch 96 et d'un dispositif gradient et pôle-dipôle direct/inverse (forward/reverse).

Des 20 profils, 13 étaient de 96 électrodes espacées de 1,5 m et 1 profil (OE11) de 72 électrodes avec les orientations suivantes :

- Orientation Nord-Sud (NS2, NS3, NS4)
- Orientation Ouest-Est (OE1, OE2, OE3, OE4, OE5, OE6, OE7, OE8, OE9, OE10)
- Orientation Sud-Ouest-Nord-Est (OE11)

Les 6 profils restants correspondent aux profils d'un suivi temporel réalisés le 3 avril 2013 dont 4 avec 72 électrodes espacées de 50 cm et 1 m et 2 profils avec 96 électrodes espacées de 1,5 m.

- Orientation Nord-Ouest (N50, N100, PN)
- Orientation Sud-Est (S50, S100, PS)

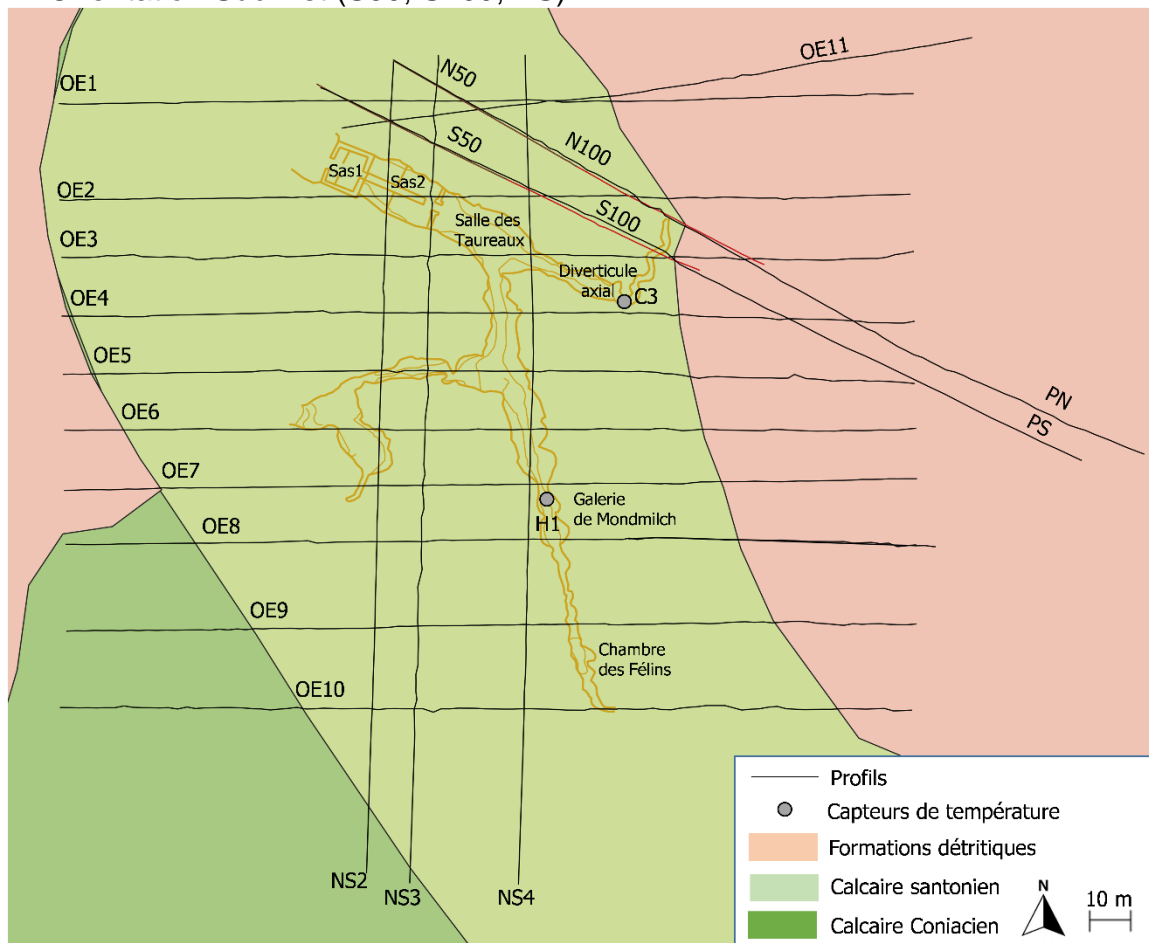


Figure 1. Localisation des profils par rapport à la projection de la grotte de Lascaux et ses formations géologiques.

3. Classification des données : CHA

En géophysique, la classification, également appelée Clustering, est couramment employée pour résoudre le défi lié au traitement d'une grande quantité de données. Dans cet article, nous appliquons un algorithme de classification hiérarchique ascendante (CHA) aux données issues de la tomographie de résistivité électrique. L'objectif est de déterminer une répartition qui reflète au mieux la géologie du site, facilitant ainsi la construction d'un modèle géostatistique tridimensionnel représentant le massif rocheux, subdivisé en sous-domaines caractérisés par des propriétés physiques et thermiques supposées homogènes.

La CHA, développée en 1963 par Ward, apparaît comme l'une des méthodes de clustering prépondérantes dans le traitement des données obtenues par Tomographie de Résistivité Électrique (Genelle et al. 2012; Xu et al. 2017; Delforge 2021; Lharti et al. 2023). Cette approche permet de segmenter un ensemble d'individus en fonction de leur matrice de proximité. Initialement, chaque élément constitue une classe. Ensuite, à chaque étape, l'algorithme regroupe les individus deux à deux pour former une nouvelle classe la plus homogène possible jusqu'à obtenir une unique classe ou classe globale qui regroupe tous les individus (Boullé *et al.* 2012). L'avantage principal de cette méthode réside dans le choix optimal du nombre de classes qui ne s'effectue qu'après l'élaboration du dendrogramme.

Après inversion des données de résistivité électrique avec le logiciel RES2DInv v.4.05.38, la classification est entreprise sur la partie supérieure du massif à l'exclusion des valeurs de résistivité supérieure à $210 \Omega \cdot m$ et dont l'altitude du point de mesure est inférieure à 182 m NGF, valeurs attribuées au calcaire coniacien qui est une formation profonde et homogène (cette classe sera désignée C6). La classification est ainsi appliquée sur une totalité de 40 410 valeurs de résistivité. Le dendrogramme obtenu (Figure 2) guide le choix du nombre de classes, dont la pertinence est évaluée grâce à notre connaissance géologique de site.

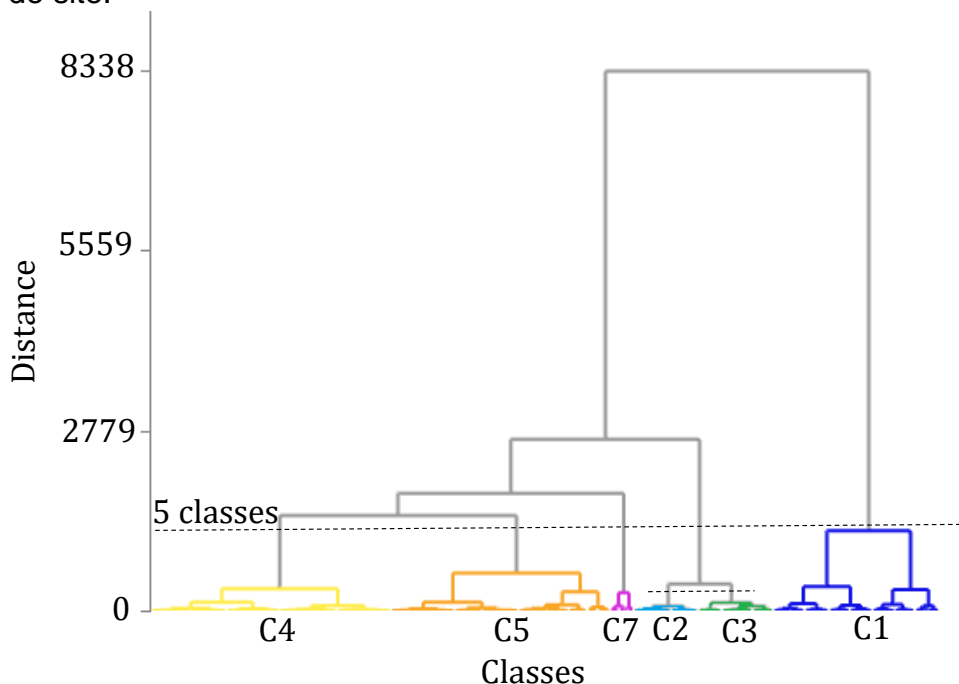


Figure 2. Dendrogramme issu de la CHA avec la coupure à 5 classes.

Sur la Figure 2, les classes qui représentent des intervalles de résistivité sont portées sur l'axe des abscisses et les distances auxquelles les classes se regroupent sont portées sur l'axe des ordonnées. Le dendrogramme permet d'identifier plusieurs classes. En se focalisant sur la coupure du dendrogramme à 5 classes, il est possible de discriminer le calcaire santonien et ses hétérogénéités résistives (C4 et C5), suivi de la classe C7 (sable), qui représente les valeurs les plus résistives, connues à l'est du site. Ensuite, on retrouve

les classes des formations argilo-sableuses (C1, C2 et C3) se situant à l'est et à l'ouest du site. Les classes C2 et C3 ont été arbitrairement séparées afin de mieux discriminer les zones conductrices traversant ponctuellement le calcaire santonien (C4). Le partitionnement du massif en 7 sous-groupes homogènes, avec les classes observées sur le dendrogramme (C1, C2, C3, C4, C5 et C7), plus la classe C6 associée au calcaire coniacien, sera utilisé après la construction du modèle 3D par une méthode géostatistique.

4. Modélisation géostatistique : Krigeage ordinaire

Les méthodes géostatistiques sont largement employées pour l'interpolation des données géophysiques (Deceuster et al. 2006; Riss *et al.* 2011; Kumar *et al.* 2007). Dans cet article, notre choix s'est porté sur la mise en œuvre du krigeage ordinaire à partir de 20 profils TRE (Figure 1) pour construire le modèle 3D en utilisant le logiciel Isatis Neo®. Une fois le modèle de l'ensemble du massif rocheux entourant la grotte construit, nous effectuons le classement des valeurs de résistivités estimées par krigeage selon les 7 classes prédéfinies par le partitionnement de la CHA (Figure 2) afin de distinguer les différents domaines géologiques environnants.

Tout d'abord, il est essentiel de définir un variogramme (Figure 3), que nous avons calculé en combinant deux modèles théoriques (exponentiel et linéaire). Une validation croisée a été réalisée, montrant un coefficient de corrélation de 0,96, confirmant ainsi une bonne concordance entre les valeurs réelles et estimées. Cette validation confirme la pertinence du variogramme utilisé pour l'interpolation par krigeage, avec un voisinage de 20 m pour le plan X-Y et de 2 m pour la direction verticale. Ce voisinage en forme d'ellipsoïde définit la zone où les points expérimentaux seront choisis pour estimer les valeurs aux nœuds de la grille régulière utilisée pour l'interpolation.

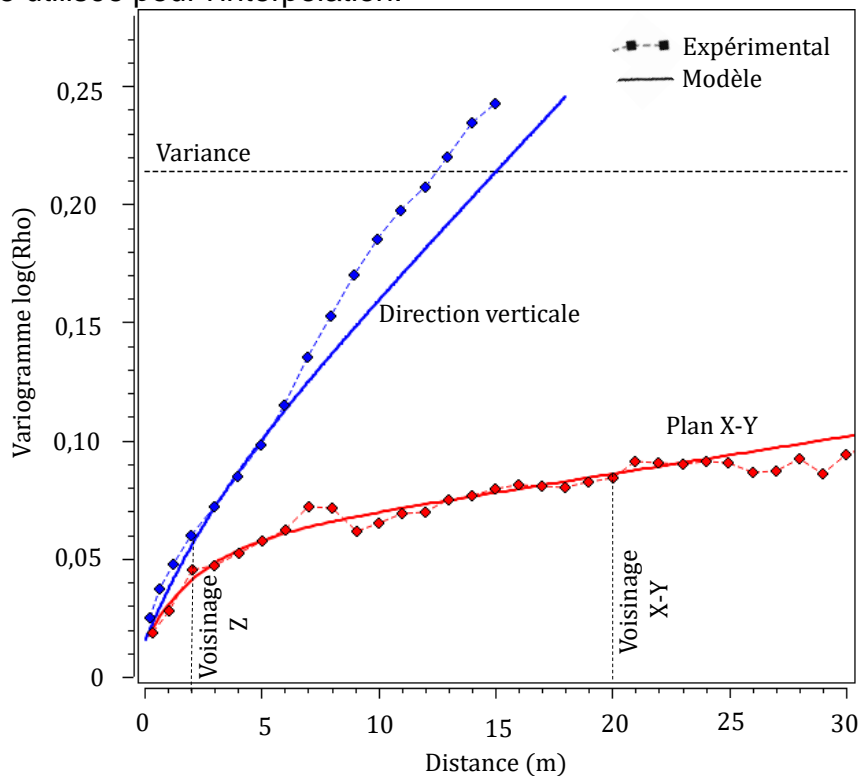


Figure 3. Variogramme expérimental directionnel calculé et modèles théoriques associés à partir du logarithme des résistivités.

5. Résultats et discussion

Les résultats de l'interpolation des valeurs de résistivités par krigeage classés selon les classes de la classification préalablement définie sont exposés sur la Figure 4. Il en résulte

une vue plus détaillée du massif, facilitant ainsi la distinction des différentes formations géologiques. En analysant la Figure 4, la classe 7, située dans la partie superficielle à l'est et caractérisée par des valeurs de résistivité variant de 410 $\Omega\cdot m$ à 7979 $\Omega\cdot m$, correspond aux sables. Les classes 4 et 5 représentent la partie centrale supérieure constituée de calcaire santonien et de zones altérées, supposées être fracturées, avec des résistivités respectives comprises entre 113 et 155 $\Omega\cdot m$ et entre 155 et 410 $\Omega\cdot m$. Les zones en bleu, bleu foncé et vert (classes 1, 2 et 3), moins résistives, sont associées aux formations sablo-argileuses détritiques prédominantes à l'est et l'ouest du massif. Une partie de ces classes (1, 2 et 3) est également présente dans le calcaire santonien, présentant des conduits karstiques sablo-argileux susceptibles d'être partiellement saturés d'eau à certaines périodes de l'année. Enfin, la partie profonde, caractérisée par la classe 6, correspond au calcaire coniacien.

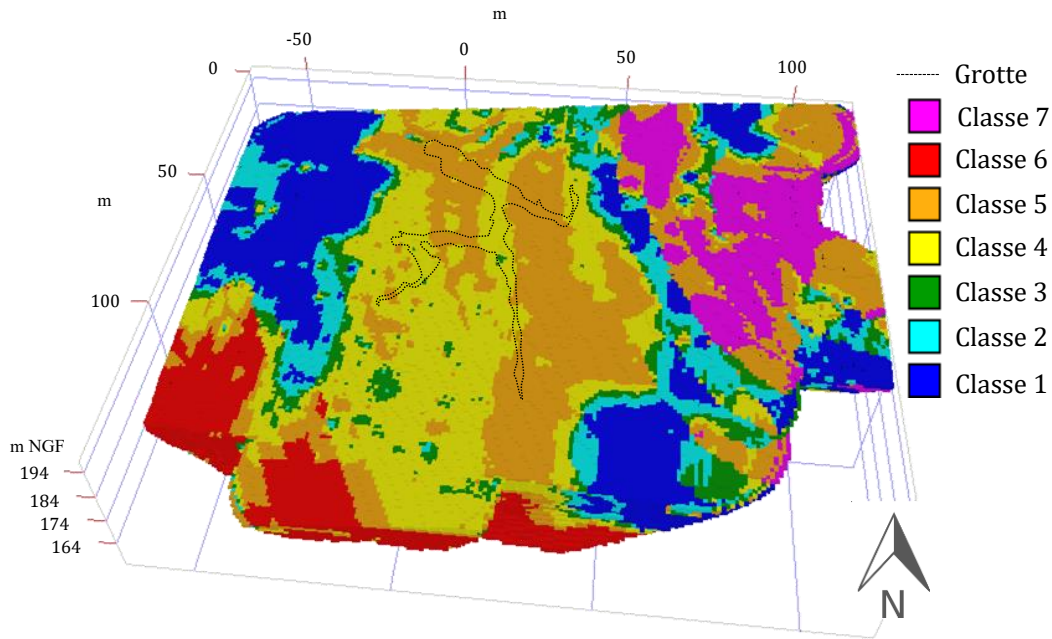


Figure 4. Modèle 3D issu du classement des résistivités estimées par krigeage. Vu du massif à 198 m NGF. La grotte commence à être visible à 186 m NGF, avec une profondeur pouvant atteindre 164 m NGF.

Le modèle 3D met en évidence des zones électriquement conductrices dans le massif rocheux (Figure 5). Ces zones présentent une conductivité nettement inférieure à celle du calcaire environnant la grotte, ce qui peut être attribué à des zones altérées poreuses à forte teneur en eau ou à des formations sablo-argileuses.

En examinant le modèle 3D à différentes profondeurs (Figure 5), nous avons identifié des zones conductrices, suggérant une possible continuité spatiale avec les zones d'arrivée d'eau dans la grotte. Dans la partie centrale du massif (Figure 5a), située au-dessus de la grotte, une première zone conductrice a été identifiée (classes 1, 2 et 3) au sein du Santonien, avec des valeurs de résistivité variant entre 4 et 113 $\Omega\cdot m$. Il est possible que cela corresponde à un conduit hydraulique (zone karstique remplie de sable susceptible de se saturer en eau). Ce conduit commence à se former à une altitude de 187 m NGF, s'élargit à 185 m NGF, et se termine à 182 m NGF, présentant une épaisseur d'environ 4 à 5 mètres. Il pourrait être lié aux écoulements observés dans le Sas2 (Figure 1), à l'intérieur de la grotte.

Une deuxième zone conductrice (Figure 5b), se situe à une profondeur plus importante, vers 176 m NGF. Cette zone pourrait entraîner une infiltration d'eau sur les parois ornées de la Salle des Taureaux (Houillon 2016; Verdet 2019).

Au sud de la grotte, une nouvelle et troisième zone conductrice est observée, principalement constituée des classes 1 et 2. Bien que cette zone ne soit pas continue, les

anomalies conductrices semblent être en relation avec les formations détritiques (Figure 5c). On pourrait établir un lien entre ces zones conductrices dans le massif et les écoulements qui se produisent à la voûte de la Chambre des Félines lors des périodes de fortes précipitations (janvier à avril), compte tenu du fait que les données étudiées ont été recueillies en mars.

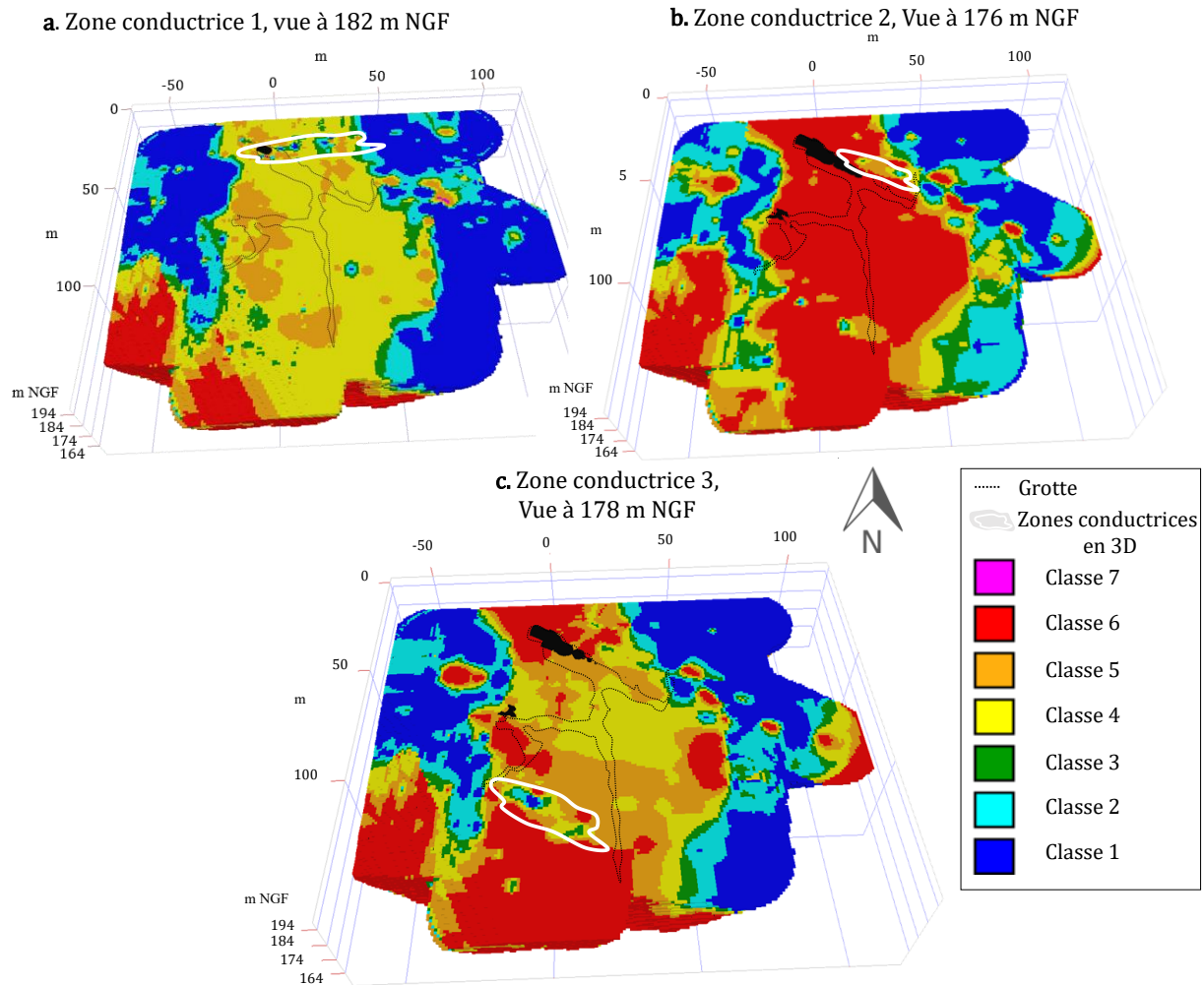


Figure 5. Modèle 3D issu du classement des résistivités estimées par krigeage (a) Vue à 182 m NGF. (b) Vue à 176 m NGF. (c) Vue à 178 m NGF

Afin d'approfondir notre analyse de ces données par CHA, nous avons étudié les données enregistrées par deux capteurs situés à l'intérieur de la grotte. Le but est d'explorer le rôle significatif des différentes classes identifiées dans le modèle 3D par rapport à la grotte,

La Figure 6 présente les températures enregistrées par les capteurs C3 et H1, placés à la même profondeur de 18,87 m, mais localisés dans des zones distinctes de la grotte, à savoir le Diverticule Axial pour C3 et la Galerie du Mondmilch pour H1.

Les deux capteurs, bien qu'étant à la même profondeur, présentent des écarts de température significatifs. Ceci s'explique principalement par la position de chacun des capteurs dans une zone géologique distincte. Le capteur C3, situé à proximité des zones conductrices (classe 1, 2 et 3), affiche des températures plus basses, influencées à la fois par la température extérieure et les propriétés physico-thermiques des formations argilo-sableuses environnantes, qui semblent probablement stocker de l'eau pendant la période humide (mesures mars 2013). En revanche, le capteur H1 enregistre des températures légèrement plus élevées, en raison de son emplacement dans le calcaire coniacien compact, situé en-dessous du Santonien et de ses hétérogénéités résistives.

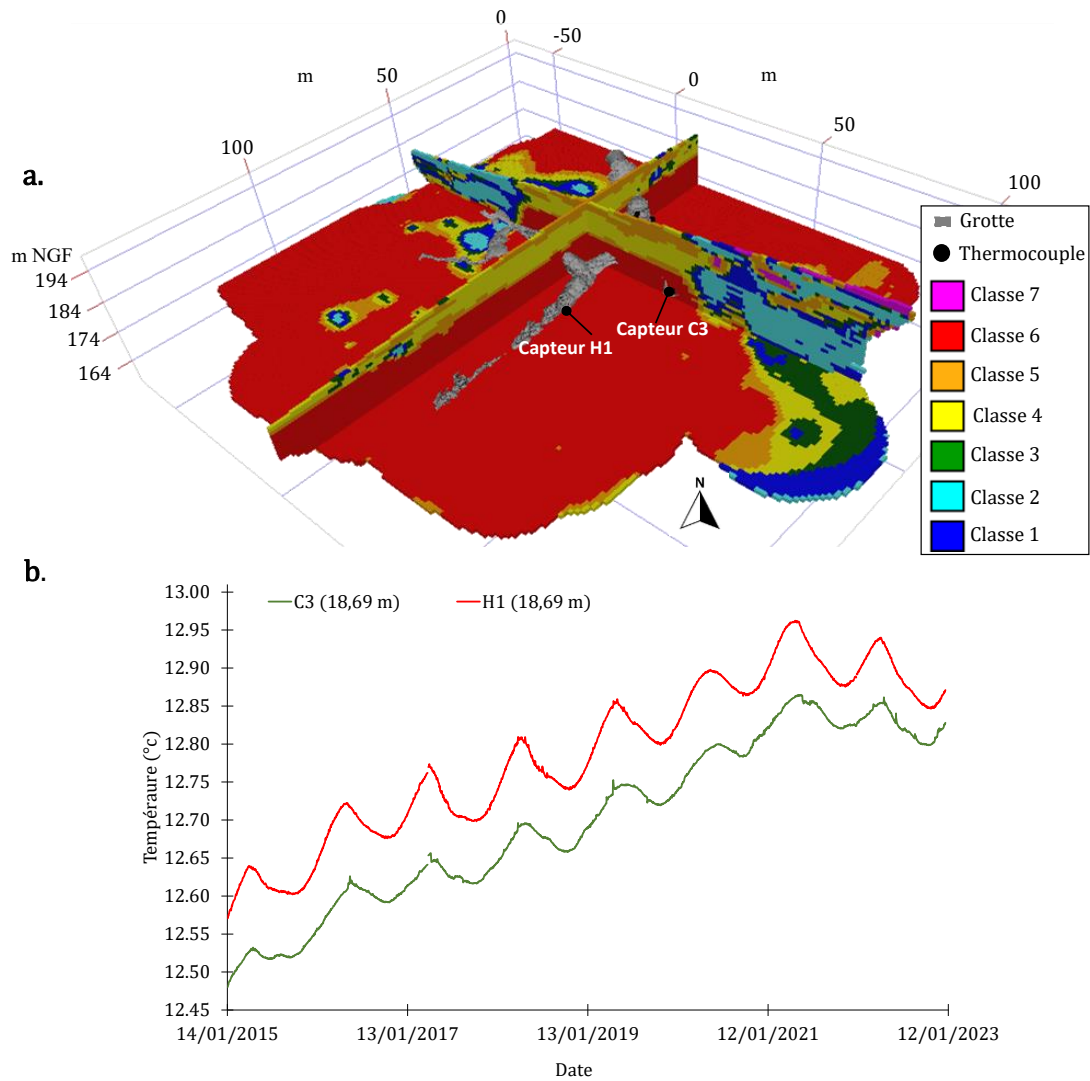


Figure 6. Couplage géophysique-thermique, (a) vue 3D du massif environnant la grotte avec 2 capteurs positionnés à la même profondeur. (b) Evolution de la température enregistrée à l'intérieur de la grotte par le capteur H1 et C3.

6. Conclusions et perspectives

La présence d'eau dans la cavité, qu'elle soit issue de la condensation ou du ruissellement, pourrait présenter un risque d'altération des parois ornées. Dans cet article, grâce à la méthodologie développée basée sur la classification des données et la modélisation géostatistique, nous avons pu repérer trois zones conductrices distinctes dans le massif rocheux, dont une première présentant un conduit karstique susceptible d'alimenter l'écoulement dans le Sas2, une deuxième zone proche de la Salle des Taureaux et une dernière vers la Chambre des Félines.

Nous avons montré que ces zones pourraient avoir un lien avec les lieux d'écoulement connus à l'intérieur de la grotte. L'identification précise de ces zones saturées dans le modèle 3D est une étape très importante dans la compréhension des variations temporelles des propriétés thermo-physiques de l'épikarst hétérogène.

Ces résultats seront utilisés pour élaborer un modèle inversé basé sur la géométrie des différentes classes et les données de température à l'intérieur de la grotte. Cela nous permettra d'estimer les valeurs de diffusivité pour chacune des 7 classes. Une fois que les diffusivités seront déterminées, une simulation de la conduction thermique dans le massif nous donnera accès aux conditions limites de température à l'interface air/paroi de la grotte. Cette approche facilitera la réalisation de simulations thermo-aérauliques plus précises,

intégrant la complexité des transferts de chaleur liés à l'hétérogénéité du milieu, pour différentes conditions climatiques.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'université de Bordeaux (France) pour son soutien financier et le Ministère français de la Culture (DRAC Nouvelle-Aquitaine) pour l'accès aux environs de la grotte et pour son soutien financier.

7. Références bibliographiques

- Deceuster, J., J. Delgranche, et O. Kaufmann. 2006. « 2D Cross-Borehole Resistivity Tomographies below Foundations as a Tool to Design Proper Remedial Actions in Covered Karst ». *Journal of Applied Geophysics* 60 (1): 68-86. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.12.005>.
- Delforge, Damien. 2021. « Time-Series Clustering Approaches for Subsurface Zonation and Hydrofacies Detection Using a Real Time-Lapse Electrical Resistivity Dataset ». *Journal of Applied Geophysics*, 15.
- Ducasse, Sylvain, et Mathieu Langlais. 2019. « Twenty Years on, a New Date with Lascaux. Reassessing the Chronology of the Cave's Paleolithic Occupations through New 14C AMS Dating ». *Paléo*, no 30-1 (décembre): 130-47. <https://doi.org/10.4000/paleo.4558>.
- Genelle, Fanny, Colette Sirieix, Joëlle Riss, et Véronique Naudet. 2012. « Monitoring Landfill Cover by Electrical Resistivity Tomography on an Experimental Site ». *Engineering Geology* 145-146 (septembre): 18-29. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.06.002>.
- Houillon, Nicolas. 2016. « La dynamique du carbon inorganique dans le continuum dol-épikarst-cavité du site de la Grotte de Lascaux (Dordogne, France). »
- Kumar, Dewashish, Shakeel Ahmed, N.S. Krishnamurthy, et Benoit Dewandel. 2007. « Reducing Ambiguities in Vertical Electrical Sounding Interpretations: A Geostatistical Application ». *Journal of Applied Geophysics* 62 (1): 16-32. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.07.001>.
- Lharti, Habiba, Colette Sirieix, Joëlle Riss, Cécile Verdet, Fabien Salmon, et Delphine Lacanette. 2023. « Partitioning a rock mass based on electrical resistivity data: the choice of clustering method ». *Geophysical Journal International*, février, ggad081. <https://doi.org/10.1093/gji/ggad081>.
- Riss, Joëlle, Juan Luis Fernández-Martínez, Colette Sirieix, Ouassima Harmouzi, Antoine Marache, et Ali Essahlaoui. 2011. « A Methodology for Converting Traditional Vertical Electrical Soundings into 2D Resistivity Models: Application to the Saïss Basin, Morocco ». *GEOPHYSICS* 76 (6): B225-36. <https://doi.org/10.1190/geo2010-0080.1>.
- Sirieix, C., et S. Xu. 2014. « Mesures géophysiques sur le site de Lascaux (24) : détermination des limites de la zone de remplissage. »
- Verdet, Cécile. 2019. « Caractérisation multi-échelle du milieu karstique non saturé », 266.
- Xu, Shan, Colette Sirieix, Joëlle Riss, et Philippe Malaurent. 2017. « A Clustering Approach Applied to Time-Lapse ERT Interpretation — Case Study of Lascaux Cave ». *Journal of Applied Geophysics* 144 (septembre): 115-24. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.07.006>.