

Caractérisation in situ et modélisation thermique des matériaux environnant la grotte de Lascaux

Habiba LHARTI¹, Fabien SALMON¹, Delphine LACANETTE¹, Colette SIRIEIX¹

¹ Université de Bordeaux, CNRS, Arts et Métiers Institute of Technology, Bordeaux INP, INRAE, I2M Bordeaux, 351 cours de la Libération F-33405 Talence, France

RESUME

La conservation du patrimoine est un enjeu social de plus en plus prégnant à cause du changement climatique. La grotte de Lascaux est particulièrement sensible à ce dérèglement qui pourrait engendrer l'apparition d'altérations sur les parois ornées. Afin de limiter cet impact, nous menons des travaux sur les transferts thermiques dans le massif rocheux. De par la nature du site, la caractérisation du massif rocheux ne peut être effectuée que par des méthodes non destructives. La tomographie de Résistivité Electrique (TRE) nous permet de mesurer la résistivité des matériaux constituant le massif rocheux autour de la grotte. La classification de ces données par des algorithmes de Machine Learning a permis de décomposer le massif en plusieurs zones présentant des propriétés similaires. L'interpolation par krigeage a permis de construire un modèle 3D subdivisé en domaines supposés thermiquement homogènes. L'utilisation de méthodes inverses sur des mesures de température, capteurs installés dans la grotte et à la surface sol nous ont fourni une estimation des propriétés thermiques des matériaux. Cette meilleure compréhension des transferts thermiques qui s'opèrent dans l'environnement de la grotte permettra une stratégie de conservation plus aboutie qu'actuellement. Cette méthodologie est applicable à la géothermie, aux ouvrages d'art, aux ouvrages souterrains, ...

Mots-clefs Grottes ornées, Méthodes géophysiques non destructives, Transferts thermiques, Changement Climatique

I. INTRODUCTION

La grotte de Lascaux constitue l'une des plus célèbres découvertes archéologiques du XXème siècle (1940). Ouverte au public en 1948, elle accueille un grand nombre de visiteurs jusqu'en 1963. Cette affluence a pour conséquence l'apparition de plusieurs indices d'altération (augmentation de température, moisissures, etc.). Afin de répondre à ces problématiques, de nombreux travaux de recherche sont menés visant à la conservation du patrimoine de la grotte, en partie sur l'aspect thermique du site. Les recherches en géophysique menées depuis 10 ans ont eu pour objectif la caractérisation du massif autour de la grotte par la Tomographie de Résistivité Electrique (TRE). Cette méthode non destructive permet la mesure de la résistivité électrique d'un matériau en y injectant un courant électrique.

Les derniers travaux (Xu et al. (2016), Verdet et al. (2020)) montrent que le massif dans lequel la grotte se développe (milieu Karstique) est très hétérogène. Ce dernier a néanmoins, jusqu'à présent,

et par manque de données, été considéré comme homogène du point de vue des caractéristiques thermiques dans le modèle 3D (Lacanette & Malaurent (2014)) utilisé dans les simulations thermo-aérauliques de la grotte.

Dans cette étude, le couplage entre les données géophysiques et thermiques est nécessaire pour affiner le modèle thermique 3D qui devra prendre en compte l'hétérogénéité des propriétés thermiques du massif. Pour ce faire, nous partitionnons les profils 2D de mesures ERT grâce à la méthode de classification CHA (Classification Hiérarchique Ascendante), qui est une méthode de Clustering largement utilisée pour la segmentation des données ERT (Delforge et al. (2021), Genelle et al. (2012), Xu et al. (2016)). L'application de la méthode d'interpolation par krigeage (Weber and Englund, 1994; Zimmerman et al., 1999) aux données ERT 2D permet ensuite de construire une représentation 3D du massif rocheux composée de différents domaines qui seront supposés homogènes. Cette représentation 3D divisée en 7 domaines est utilisée pour caractériser les propriétés thermiques de chacun. La procédure appliquée se base sur une méthode inverse, l'algorithme de Nelder-Mead (Nelder and Mead (1965)) connu pour être une des méthode d'optimisation la plus efficace (Maréchal (2014), Zhang et al. (2019)). La caractérisation thermique du massif rocheux permettra in fine la réalisation de simulations de la convection thermique à l'intérieur de la grotte.

Nous commençons par une brève description des données géophysique et thermique. Nous présentons ensuite les résultats issus de la classification par la méthode CHA, le modèle 3D résultant de l'interpolation des données géophysiques et l'application des méthodes inverses pour la caractérisation des propriétés thermiques du massif.

PRESENTATION DES DONNEES

La grotte de Lascaux mesure 235 m de long et s'enfonce jusqu'à une profondeur de 20 m. La grotte est instrumentée par plus de 150 capteurs qui recueillent des données toutes les minutes depuis plus de dix ans. Des capteurs, mesurant les précipitations, la température extérieure et le rayonnement solaire, sont positionnés à l'extérieur, au-dessus de la grotte. D'autres capteurs, situés à l'intérieur de la grotte, mesurent la température de l'air et de la roche, les débits, les niveaux de CO₂ et l'humidité de l'air. Dans le cadre de cette étude, seulement la température extérieure et les thermocouples à l'intérieur de la grotte sont exploités (Fig.1).

Pour la caractérisation du sol, les mesures géophysiques réalisées par (Xu et al. (2016)) sont utilisées dans cette étude. Il s'agit de 20 profils ERT (Fig.1) constitués de 96 électrodes espacés de 1,5 m et d'environ 144 m de longueur, à l'exception des profils localisés au nord de la grotte où il y a trois configurations différentes dont deux composées de 72 électrodes présentant un espacement de 0,5 m ou 1 m et une composée de 96 électrodes espacées de 1,5 m. Les types de dispositifs utilisés sont pôle dipôle – gradient pour tous les profils. Le nombre total de valeurs de résistivité résultant des mesures ERT s'élève à 57 760.

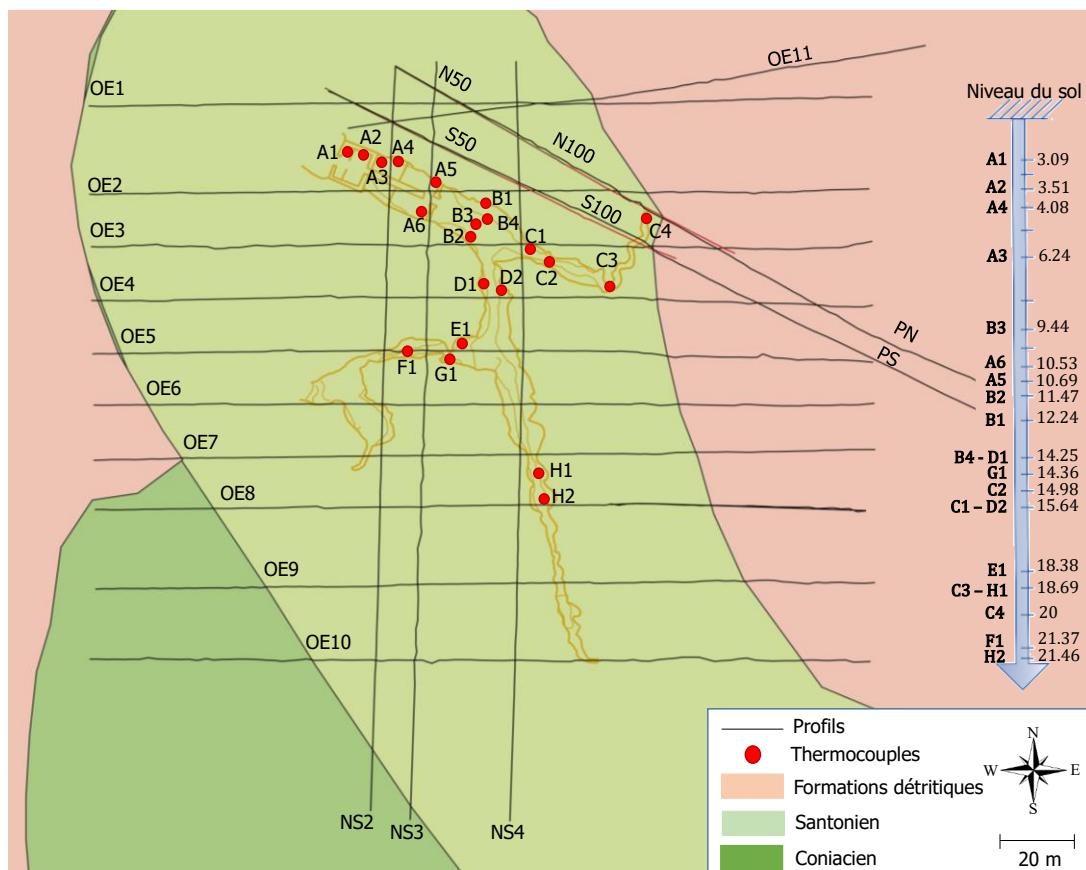


Figure 1. Vue en plan de la grotte de Lascaux et de sa géologie environnante. Représentation des profils TRE et localisation des thermocouples à l’intérieur de la grotte (d’après Verdet et al. (2020)).

III. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus à partir des mesures géophysiques et des thermocouples existants. Dans un premier temps, nous présentons les résultats du partitionnement du massif rocheux en différents groupes supposés homogènes. Dans un deuxième temps, nous procédons à la construction d’une représentation 3D du massif rocheux basée sur le partitionnement obtenu à partir de la classification. Enfin, nous présentons la caractérisation thermique résultant de l’application des méthodes inverses.

A. Classification des données

La méthode de classification CHA a été appliquée aux valeurs logarithmiques de résistivité correspondant aux critères de seuillage basés sur la valeur de résistivité (inférieure à 210 $\Omega \cdot m$) et l’altitude (supérieure à 182 mNGF). Ces critères permettent de conserver la partie supérieure du massif (Santonien) et les parties est et ouest des profils (formations détritiques), tout en excluant les données correspondant au Coniacien (formation profonde et homogène). En effet, le comportement thermique de la grotte résulte principalement des transferts thermiques dans la partie supérieure du massif. La partie coniacienne sera considérée comme une seule classe homogène, notée 6 sur la figure 2.

Les résultats obtenus avec la méthode CHA (Lharti et al., 2022) (Fig.2) coïncident avec les connaissances géologiques que nous avons de l'environnement entourant la grotte de Lascaux (Platel (1987), Xu et al. (2016), Verdet et al. (2020)). Dans la partie centrale supérieure du massif, dont on sait qu'elle est principalement composée du Santonien, nous avons pu distinguer 3 classes (3, 4 et 5) représentant principalement le calcaire du Santonien et ses hétérogénéités. Dans la partie ouest, 2 classes (1 et 2), les moins résistives, appartiennent aux formations détritiques. Enfin, dans la partie est, on distingue également des zones faiblement résistives (classes 1 et 2) qui font partie des formations détritiques. Des zones très résistives en surface qui correspondent aux sables sont aussi observées.

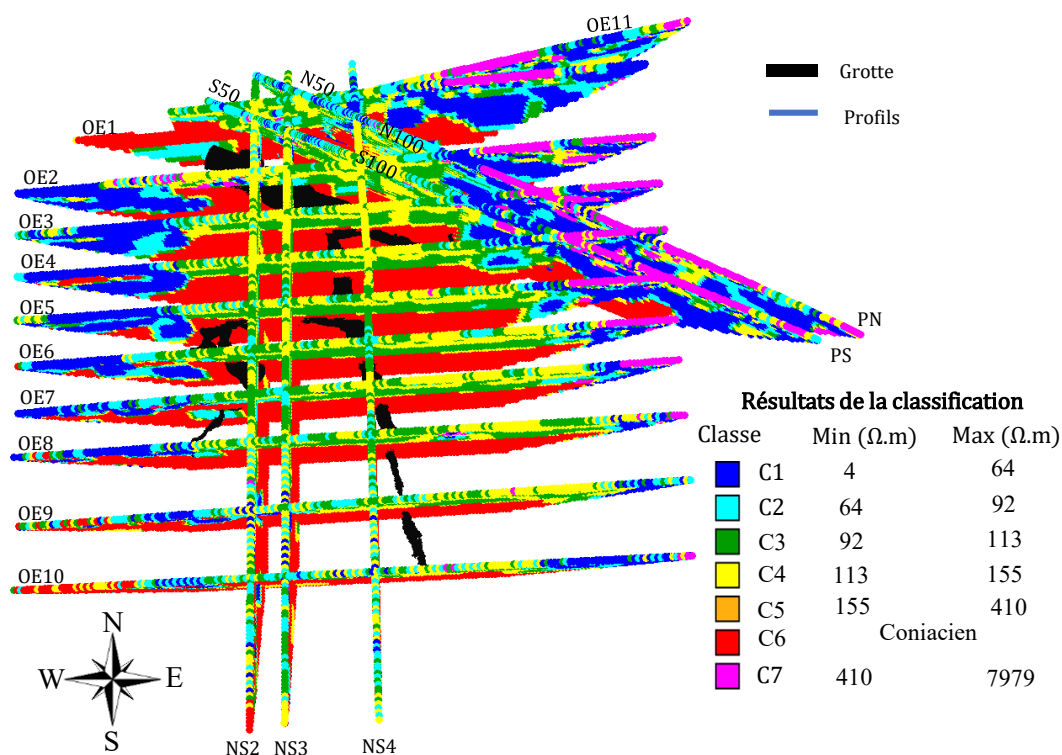


Figure 2. Résultats après application de la méthode CHA à tous les profils.

B. Modélisation 3D du massif rocheux

Les résultats de l'interpolation (Fig.3) montrent la représentation 3D obtenue par krigeage après avoir appliqué les résultats de la CHA (Fig.2). L'interpolation entre les profils ERT 2D conduit à la visualisation globale du massif et montre l'évolution des différentes formations (Guillot et al. (1977), Platel (1987), Verdet et al. (2020), Xu et al. (2016)) en fonction de la profondeur. Les sables présents dans la partie est sont très peu profonds puisqu'ils disparaissent après un mètre. A environ 4 mètres sous le niveau du sol, nous avons identifié des zones conductrices proche de la grotte. Ces zones peuvent correspondre aux conduits karstiques ou structures fortement altérées dans le calcaire permettant la circulation préférentielle de l'eau jusqu'aux émergences visibles dans la grotte.

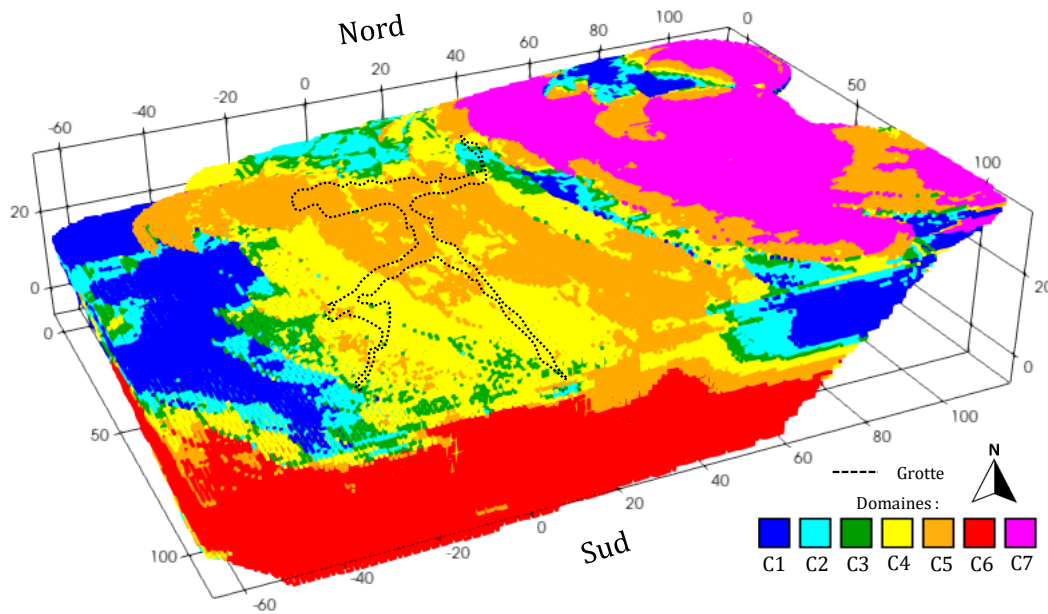


Figure 3. Représentation 3D du massif rocheux entourant la grotte de Lascaux.

Cette interpolation par krigeage montre l’importante hétérogénéité du massif de la grotte de Lascaux. En particulier, la partie supérieure du massif à l’aplomb de la grotte se caractérise par différentes formations géologiques : le calcaire Santonien (en jaune), ses hétérogénéités (en orange) et en profondeur, où la grotte se développe en majorité, le calcaire coniacien (en rouge). Ces formations jouent donc un rôle plus important que celles se trouvant à la périphérie de la grotte, dans le transfert thermique dans l’épikarst. La mise en évidence des hétérogénéités du Santonien justifie l’étude géophysique préliminaire aux calculs thermiques présentés dans la section suivante.

C. Caractérisation des propriétés thermiques du massif rocheux

La détermination des 7 diffusivités thermiques des domaines supposés homogènes (Fig. 3) améliorera la simulation du transfert de chaleur dans le massif rocheux. La simulation de la conduction thermique est réalisée à l’aide du logiciel Notus CFD (Computational Fluid Dynamics) qui résout l’équation thermique suivante :

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} = \nabla \cdot \lambda \nabla T$$

où ρ est la densité, c_p est la capacité thermique massique, λ est la conductivité thermique et T est la température.

La détermination des diffusivités thermiques optimales à partir de mesures expérimentales est un problème inverse. Celui-ci peut être résolu par des algorithmes d’optimisation (Fletcher (1987)), comme par exemple la méthode de Gauss-Newton, de gradient, de Newton, ou encore de Nelder Mead. Parmi tous les algorithmes, nous choisissons l’algorithme de Nelder-Mead (Nelder and Mead (1965)) qui est connu pour être efficace dans un espace multidimensionnel (Cerdà et al. (2016)), comme dans notre étude 3D. Maréchal (2014) a comparé différents algorithmes (Levenberg-Marquardt (Moré (1978)), l’algorithme génétique et l’algorithme de Nelder-Mead) pour caractériser les matériaux à changement de phase. Son étude révèle que l’algorithme de Nelder-Mead est le plus

robuste et rapide. Zhang et al. (2019) ont estimé la conductivité thermique et la capacité thermique volumétrique d'un sol stratifié en utilisant l'algorithme de Nelder-Mead. Ils ont ainsi pu simuler l'évolution verticale de la température du sol de manière très précise. Rendu et al. (2019.) ont aussi utilisé cet algorithme dans un cas de transfert thermique unidimensionnel appliqué à un mur multicouche. Ils ont montré que la méthode inverse utilisée est très précise pour l'estimation de la résistance et la capacité thermique des murs soumis à des conditions météorologiques réelles.

La procédure de résolution de l'algorithme de Nelder-Mead est la suivante :

- Etape 1 : Initialisation des diffusivités thermiques.
- Etape 2 : Simulation de la conduction thermique
- Etape 3 : Comparaison des résultats avec les mesures et application de l'algorithme de Nelder-Mead pour calculer les nouvelles diffusivités thermiques. Retour à l'étape 2
- Etape 4 : Fin de la procédure après convergence.

Nous utilisons la fonction objectif suivante dans notre approche $\sum_{i=1}^N \frac{|\delta\phi_{\text{exp}}^i - \delta\phi_{\text{sim}}^i|^2}{|\delta\phi_{\text{exp}}^i|^2} + \frac{|\Delta T_{\text{exp}}^i - \Delta T_{\text{sim}}^i|^2}{|\Delta T_{\text{exp}}^i|^2}$,

où $\delta\phi$ est le déphasage de l'onde par rapport à la température extérieure, ΔT est la différence entre les températures minimum et maximum de l'onde thermique, l'indice exp se réfère aux mesures expérimentales et l'indice sim se réfère aux résultats de simulation.

La résolution du problème inverse nous conduit à une diffusivité thermique pour chaque division du massif. Celle du calcaire Santonien est d'environ $2 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, celle du calcaire Coniacien est d'environ $1.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et celle des hétérogénéités très résistives du Santonien est d'environ $5 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Pour les structures fortement altérées dans le calcaire Santonien (zones conductrices) et présentes dans les parties est et ouest du massif (formations détritiques), les diffusivités sont les suivantes : $1,06 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour le domaine le plus conducteur électriquement (classe 1), $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour la classe 2 et une diffusivité de $7,4 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour la classe 3.

Finalement, pour la partie superficielle de l'est du massif, la diffusivité est de $3,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ correspondant aux sables. Ces valeurs disparates montrent le caractère hétérogène du massif de la grotte de Lascaux. En moyenne, l'erreur relative commise sur le déphasage de l'onde thermique est de 14% tandis que celle sur l'amortissement est de 18%.

La figure 4 montre le champ de température après 8 années de simulation de la conduction thermique dans le massif rocheux ayant débuté en janvier 2014. Le champ de température du massif peut être divisé en trois zones :

- Une partie plus froide proche de la surface du sol (entre 11 et 12°C)
- Une partie plus chaude verticalement au centre du massif (supérieures à 12,5°C)
- Une partie de température intermédiaire dans la partie plus profonde du massif.

Cette configuration est propice au déclenchement d'une convection thermique dans la grotte du au gradient thermique.

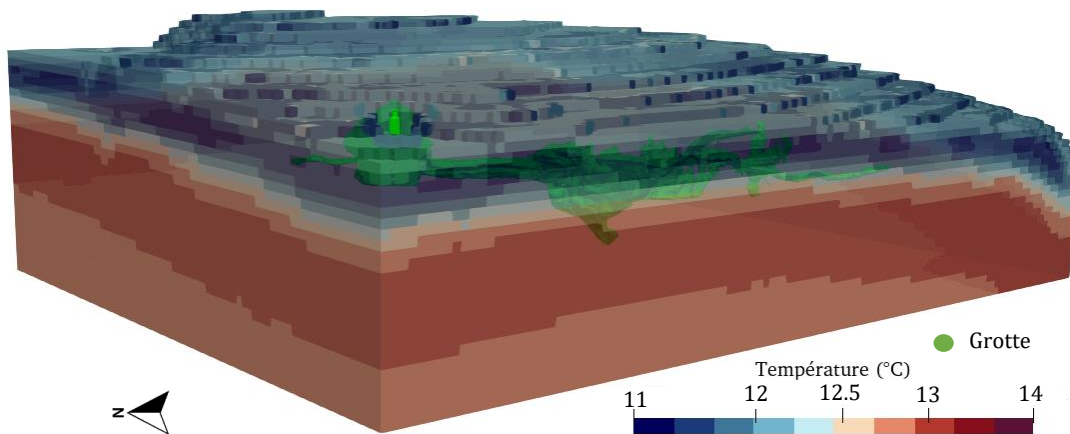


Figure 4. Champ de température simulé dans le massif de la grotte de Lascaux.

VI. CONCLUSION

La conservation de la grotte de Lascaux demande une compréhension fine de son environnement. L'utilisation des méthodes non destructives par ERT nous ont permis de caractériser la géologie du massif. La classification des données par la CHA a conduit à un partitionnement du massif en des domaines les plus homogènes possibles. L'interpolation par krigeage a été employée afin de construire une représentation 3D à partir des profils 2D issus de l'ERT. Les résultats issus de ces deux premières étapes ont permis la segmentation géométrique du massif en sept zones. L'application de l'algorithme de Nelder-Mead à la résolution de la conduction thermique a fourni les diffusivités thermiques minimisant l'erreur entre les mesures et la simulation numérique. La simulation de la propagation de la chaleur dans le massif rocheux montre que le champ de température est très affecté par l'hétérogénéité géologique.

Les résultats obtenus dans cette étude pourront être améliorés dans les prochaines simulations. Les résultats finaux permettront la réalisation future de simulations thermo-aérauliques à l'intérieur de la grotte. De plus, la méthodologie utilisée dans cet article peut être appliquée dans différents domaines de génie civil, comme la géothermie ou les travaux souterrains où les transferts de masse sont nécessaires.

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 leur soutien financier.

REFERENCES

- Cerdà, V., Cerdà, J.L., Idris, A.M., (2016). Optimization using the gradient and simplex methods. *Talanta* 148, 641–648. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.05.061>
- Delforge, D., Watlet, A., Kaufmann, O., Van Camp, M., Vanclooster, M., (2021). Time-series clustering approaches for subsurface zonation and hydrofacies detection using a real time-lapse electrical resistivity dataset. *Journal of Applied Geophysics* 184, 104203. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104203>
- Genelle, F., Sirieix, C., Riss, J., Naudet, V., (2012). Monitoring landfill cover by electrical resistivity tomography on an experimental site. *Engineering Geology* 145–146, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.06.002>
- Lacanette, D., Malaurent, P., (2014). Préviation climatique 3D dans la grotte de Lascaux. *karstologia* 63, 49–57.
- Lharti, H., Sirieix, C., Riss, J., Verdet, C., Lacanette, D., (2022). Clustering Methods Applied to Electrical Resistivity Data, in: NSG2022 28th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. Presented at the NSG2022 28th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, European Association of Geoscientists & Engineers, Belgrade, Serbia & Online, pp. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202220042>
- Maréchal, W., (2014). Utilisation de méthodes inverses pour la caractérisation de matériaux à changement de phase 212.
- Moré, J.J., (1978). The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory, in: Watson, G.A. (Ed.), *Numerical Analysis, Lecture Notes in Mathematics*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 105–116. <https://doi.org/10.1007/BFb0067700>
- Nelder, J.A., Mead, R., (1965). A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal* 7, 308–313. <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>
- Platel, J.-P., (1987). Le Crétacé supérieur de la plateforme septentrionale du Bassin d’Aquitaine. Stratigraphie et évolution géodynamique. Document B.R.G.M 581.
- Rendu, M., Le Dréau, J., Salagnac, P., Doya, M., Colmet Daâge, M., n.d. Comparison Of Models To Identify Thermal Characteristics Of Multi-layer Building Walls Using Inverse Methods. Presented at the Building Simulation (2019), Rome, Italy, pp. 539–546. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.211229>
- Verdet, C., Sirieix, C., Marache, A., Riss, J., Portais, J.-C., (2020). Detection of undercover karst features by geophysics (ERT) Lascaux cave hill. *Geomorphology* 360, 107177. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107177>
- Weber, D.D., Englund, E.J., (1994). Evaluation and comparison of spatial interpolators II 15.
- Xu, S., Sirieix, C., Marache, A., Riss, J., Malaurent, P., (2016). 3D geostatistical modeling of Lascaux hill from ERT data. *Engineering Geology* 213, 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.09.009>
- Zhang, C., Song, W., Liu, Y., Kong, X., Wang, Q., (2019). Effect of vertical ground temperature distribution on parameter estimation of in-situ thermal response test with unstable heat rate. *Renewable Energy* 136, 264–274. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.112>
- Zimmerman, D., Pavlik, C., Ruggles, A., Armstrong, M.P., (1999). An Experimental Comparison of Ordinary and Universal Kriging and Inverse Distance Weighting 16.