

INFLUENCE D'UNE SERIE D'ABATTAGE D'ARBRES SUR LE COMPORTEMENT HYDRIQUE DU MASSIF DE LASCAUX

INFLUENCE OF A SERIES OF TREE FELLINGS ON THE WATER BEHAVIOR OF THE LASCAUX MASSIF

Marie LARCANCHE¹, Colette SIRIEIX¹, Jean-Christophe DOMECH², Fabien SALMON¹, Sylvain MATEO¹, Joëlle RISS¹, Stéphane PERRIN³, Cécile VERDET¹

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

² Département de Foresterie, Bordeaux Sciences Agro, INRAE, UMR 1391 ISPA, F-33882 Villenave-d'Ornon, France

³ Forêt Conseils, 57 avenue Aliénor F-33830 Belin-Beliet, France

Avec le soutien de l'Etat Ministère de la Culture Direction régionale des affaires culturelles de Nouvelle-Aquitaine

RÉSUMÉ – La végétation joue un rôle dans le comportement hydrique d'un milieu karstique non saturé. Cet article examine l'influence de l'abattage de plus de 10% des arbres sur la teneur en eau du massif de Lascaux, basé sur une surveillance mensuelle de la résistivité électrique effectuée durant 10 ans. Les résultats montrent que la régulation hydrique du massif karstique s'équilibre à partir de deux à trois ans après la gestion sylvicole.

ABSTRACT – Vegetation has the potential to affect the water behavior of an unsaturated karst environment. This study investigates the impact of tree felling on the water content of the Lascaux massif, using monthly electrical resistivity measurements from the past decade. The findings indicate that the karstic massif's water balance recovered only two to three years after silvicultural activities.

1. Introduction

La grotte de Lascaux est l'une des grottes ornées les plus importantes au monde, mais elle a connu des problèmes de conservation en raison d'une fréquentation excessive jusque dans les années 1960. Malgré sa fermeture en 1963, la préservation de la grotte reste une préoccupation majeure. L'une des problématiques principales concerne la présence d'eau le long des parois de la grotte, que ce soit en raison de la condensation ou de l'eau provenant du massif environnant.

L'acquisition de tomographies de résistivité électrique (TRE) quasi mensuelles depuis 2012 a permis de mettre en évidence la forte hétérogénéité du massif calcaire entourant la grotte ainsi que la présence de conduits préférentiels de circulation d'eau atteignant l'émergence d'eau de la grotte. De plus, depuis 2017, des études écophysiologicals sont menées, en amont de la grotte, dans le but d'étudier le rôle de la végétation, essentiellement des arbres, sur le comportement hydrique du massif.

La gestion forestière du site de Lascaux, initiée en 2013, vise principalement à prévenir les risques d'incendie et à assurer un suivi sanitaire adéquat de la forêt. Les risques de chablis, notamment lors de tempêtes, ainsi que la présence d'une végétation dense et sèche (Pins sylvestres et Chênes pubescents essentiellement), augmentent les dangers potentiels pour le site et la grotte. Par conséquent, une gestion forestière appropriée est essentielle pour réduire ces risques en entretenant la végétation, en effectuant des élagages et en créant des zones coupe-feu. Cet abattage n'est cependant pas sans

conséquence sur le massif rocheux. L'étude présentée tend à décrire les conséquences de cet abattage d'arbres et s'inscrit dans le cadre de la préservation de la grotte tant à court, qu'à moyen ou long terme dans le contexte actuel de changement climatique.

Notre étude porte sur deux problématiques : (1) la réaction du massif à la suite d'une série d'abattage de Pins sylvestres autour d'un profil de TRE, et (2) la durée de réaction des arbres environnants (temps que mettent les arbres restant à compenser l'effet des arbres abattus) et son influence sur le massif rocheux.

2. Site d'étude

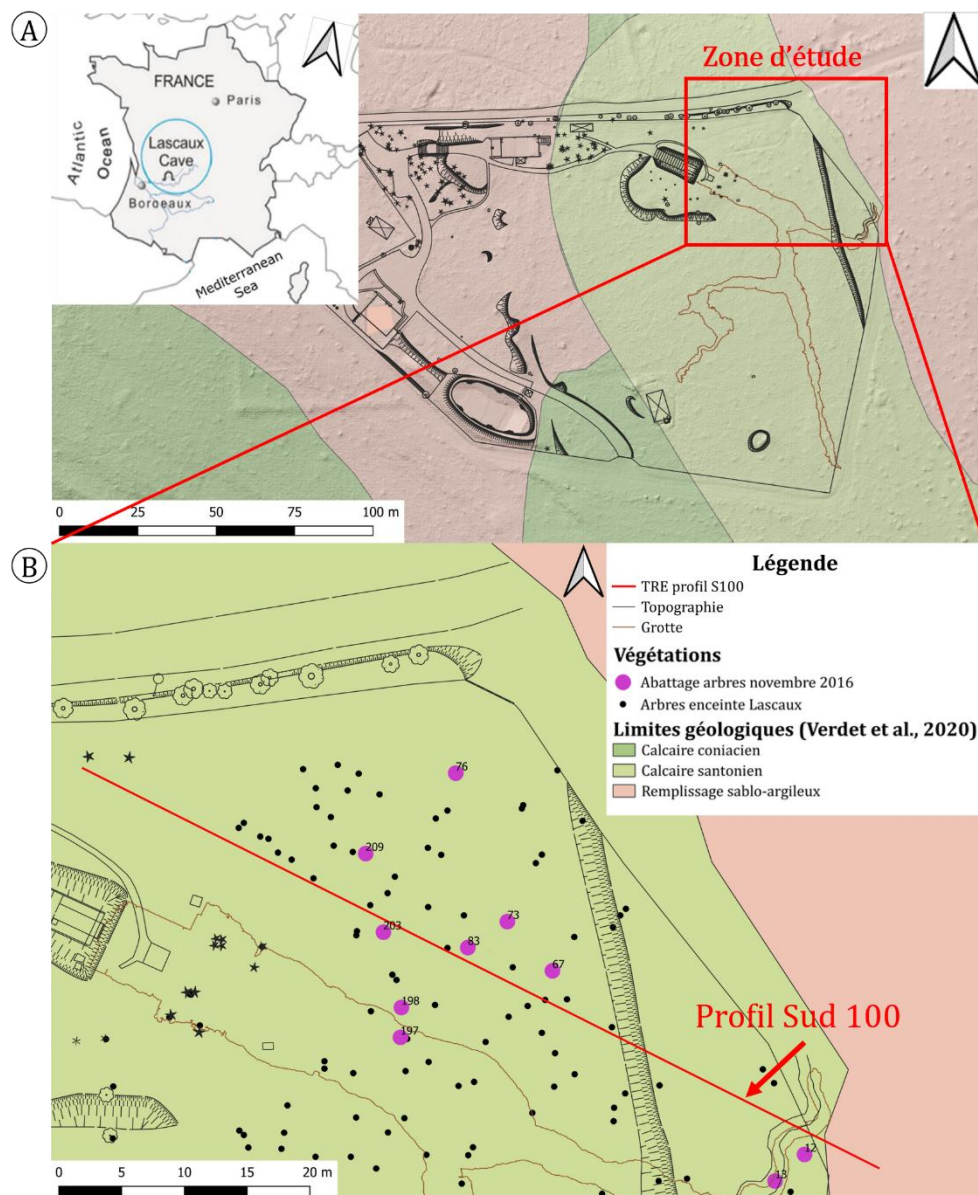


Figure 1 : Carte géologique du massif de Lascaux vue générale (A) et zone d'étude (B). La grotte se trouve approximativement à 4 m de profondeur.

La colline de Lascaux est située dans le bassin aquitain, à environ 1 km au sud-est de Montignac, dans la région du Périgord Noir en Dordogne (Figure 1). Le massif de la grotte de Lascaux est constitué de formations géologiques du Crétacé supérieur (Figure 1), qui font partie du karst Périgourdin. La géologie du massif a été étudiée et cartographiée régulièrement au fil des années (en particulier depuis la fermeture de la grotte). La dernière version de la carte géologique (Figure 1), réalisée par Verdet *et al.* (2020), est une amélioration de celles de Schoeller (1965) et des annotations de Guillot *et al.* (1979).

Le massif comprend des formations du Coniacien (C4b) et du Santonien (C5a), ainsi que des matériaux détritiques tels que des sables argileux. Selon Verdet *et al.* (2020), il a été démontré que la limite entre ces deux calcaires se situait entre 179 et 182 m NGF. Ainsi, l'entrée de la grotte se développe dans le calcaire santonien, tandis que la majeure partie de la grotte est située dans le calcaire coniacien. Il semble que le calcaire santonien soit plus altéré que le calcaire coniacien.

3. Matériels et méthodes

Bien que les mesures de TRE effectuées depuis 2012 (dispositifs gradient et pôle-dipôle) aient été préalablement examinées dans les thèses de Xu (2015) et de Verdet (2019), elles n'avaient pas pour objectif initial d'être analysées au regard de l'abattage d'arbres qui, par ailleurs n'a débuté qu'en 2016. Le profil examiné dans cette étude est le profil Sud 100 (Figure 1(B)), caractérisé par un espacement inter-électrode de 1 m et composé de 72 électrodes. Ce profil s'étend sur 71 m de long pour environ 15 m de profondeur.

La mesure de tomographie de résistivité électrique est inversée avec Res2DInv® v. 4.05.38, norme L1 (mieux adaptée à l'hétérogénéité du karst) et le maillage est raffiné pour atteindre ½ espacement inter-électrodes. Les mesures étant réalisées en suivi temporel, il est nécessaire de s'affranchir de l'influence de la température sur la résistivité électrique. Pour cela, les mesures sont corrigées de l'effet de la température à l'aide de la formule du modèle ratio (Xu, 2015). De plus, afin d'être précis concernant les blocs de résistivité situés à une faible profondeur, nous avons utilisé un modèle thermique prenant en compte les différents transferts thermiques s'opérant dans le sol et le massif rocheux et plus particulièrement le rôle de l'évapotranspiration (Salmon *et al.*, 2023).

Le suivi de la végétation forestière effectué avec géoréférencement des arbres nous a permis d'identifier un abattage d'environ 200 arbres intervenu en novembre 2016 (points violets sur la Figure 1(B)), sur tout le massif de Lascaux, avec, en particulier, des Pins sylvestres et des Chênes pubescents dont huit autour des profils TRE.

La TRE étant sensible à la teneur en eau du massif, l'analyse des données pré et post abattage permet d'explorer les variations spatiales et temporelles du comportement hydrique du massif. Cette approche vise à déterminer si l'abattage des arbres induit des modifications dans la distribution de l'eau, tout en identifiant les zones spécifiques du massif qui ont été impactées par cette intervention.

La majeure partie du profil Sud 100 attribuable au calcaire santonien hétérogène (Figure 2) présente une résistivité variant autour de 150 $\Omega \cdot m$ avec des zones plus conductrices. Dans la proximité de ce profil, sept Pins sylvestres ont été abattus en novembre 2016, puis un Chêne pubescent en février 2017. Parmi les arbres, il y en a qui sont qualifiés de dominants (D); ils sont généralement identifiés par des racines plus profondes et plus étendues, facilitant une absorption d'eau à des profondeurs significatives ce qui ne signifie pas nécessairement un prélèvement d'eau plus important par rapport aux arbres dominés (Liu *et al.*, 2020). Les caractéristiques de dominance des autres arbres abattus sont : arbres dominés (d) ou co-dominants (co-D,) (Figure 2).

La quantité d'eau absorbée par chaque arbre est influencée par plusieurs facteurs dont son diamètre (une plus grande surface conductrice entraînant une transpiration accrue), son état de santé, et sa capacité à transporter l'eau des racines vers les feuilles pour les chênes ou vers les aiguilles pour les pins.

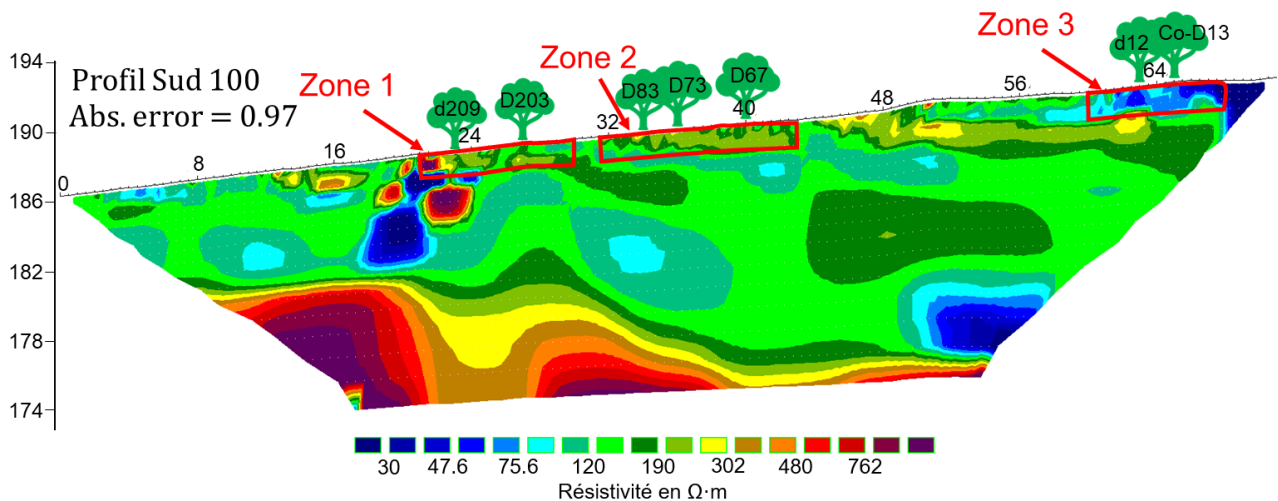


Figure 2 : Profil Sud 100 et localisation des trois zones d'études au droit des arbres abattus en novembre 2016. Arbres dominants (D), dominés (d) ou co-dominants (co-D). Sur le profil du 2 juillet 2013

4. Résultats et discussion

4.1. Etude des mesures de résistivité électrique en lien avec les conditions climatique

Pour évaluer les conséquences de l'abattage sur le comportement hydrique du massif de Lascaux, nous avons examiné l'évolution des résistivités électriques du profil S100 au cours du temps aux emplacements précis des arbres abattus (Figure 2). La profondeur des zones d'étude a été fixée initialement à 1,2 m suite aux premières études du site (Xu *et al.*, 2017) avec une largeur de 5 m autour de chaque arbre afin d'englober au mieux l'espace racinaire de chaque arbre. Au total, trois zones ont été étudiées sur le profil sélectionné.

La zone 1 comprend un arbre dominé (d209) et un arbre dominant (D203) abattus, la zone 2 comprend trois arbres dominants (D83, D63, D67) abattus et la zone 3 comprend un arbre dominé (d12) et un arbre co-dominant (co-D13) abattus.

L'évolution de la médiane des résistivités de chacune des zones du profil Sud 100 est représentée sur la Figure 3, de juin 2013 à novembre 2022.

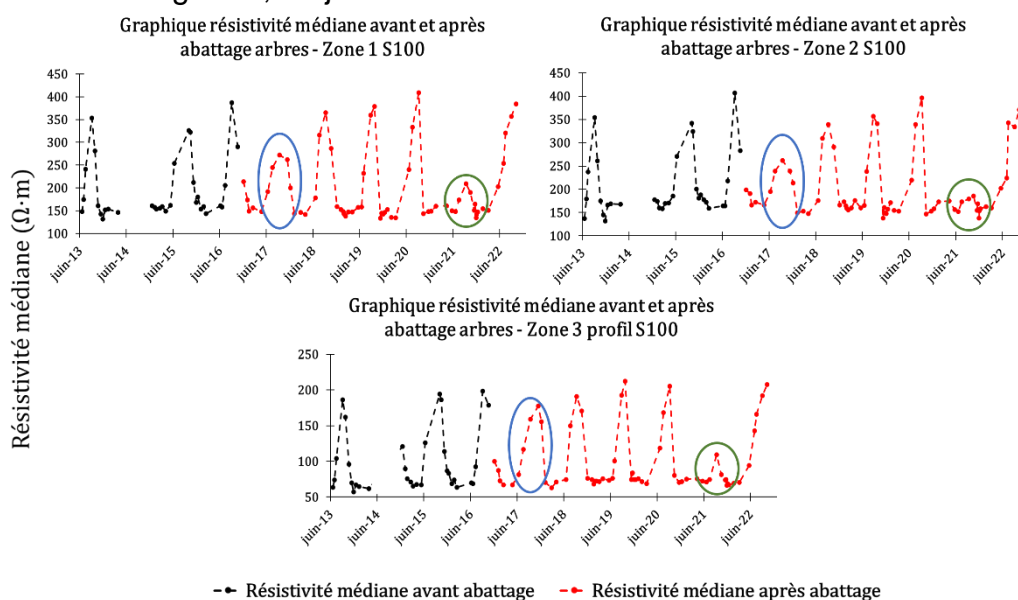


Figure 3 : Variations des résistivités médianes au cours du temps pour chacune des trois zones d'études

Les variations de résistivité sont notables pour chacune des quatre zones étudiées. Les zones 1 et 2 montrent une résistivité variant entre environ 140 et 380 $\Omega \cdot m$ au cours de l'année, tandis que la zone 3 présente des valeurs de résistivité plus basses, fluctuant entre environ 75 et 200 $\Omega \cdot m$ en raison de la nature géologique sablo-argileuse de cette zone (Figure 1).

Une faible résistivité (respectivement 140 et 75 $\Omega \cdot m$) est systématiquement observée chaque hiver, atteignant toujours la même valeur pour une formation donnée, suggérant que la saturation a atteint le seuil de percolation. Les valeurs maximales de résistivité médiane varient sensiblement au fil du temps et pour chacune des zones. Deux périodes en particulier se distinguent par une résistivité médiane maximale plus faible que les autres années, à savoir les étés 2017 et 2021 (cercles bleus et verts sur la Figure 3).

La diminution de la résistivité observée durant l'été 2021 peut être attribuée aux importantes précipitations enregistrées sur le site entre avril et octobre 2021, comme illustré sur la Figure 4. Ces pluies abondantes ont induit une augmentation de la teneur en eau du sol, entraînant ainsi une diminution de la résistivité électrique mesurée.

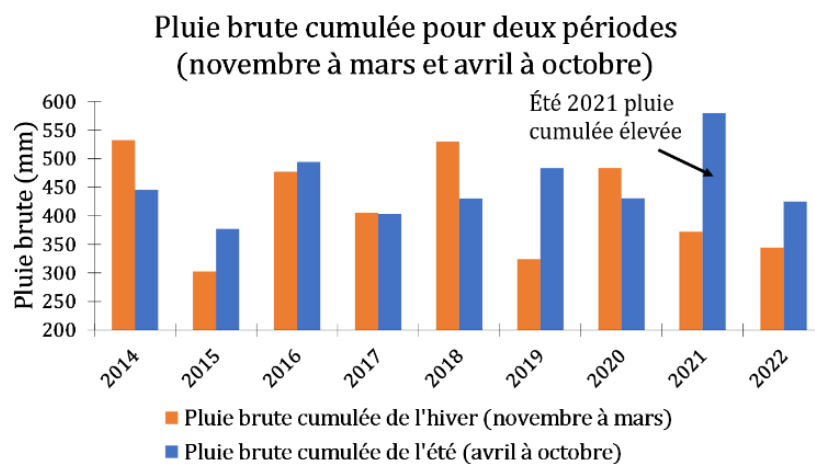


Figure 4 : Précipitation de novembre à mars (en orange) et d'avril à octobre (en bleu) (Pour l'année 2014, c'est de novembre 2013 à mars 2014 et d'avril 2014 à octobre 2014)

En été 2017, été suivant l'abattage des arbres, une baisse de la résistivité médiane maximale est observée pour chacune des zones étudiées (indiquée par un cercle bleu sur la Figure 3). Cette diminution ne peut être expliquée par les précipitations, car elles sont comparables à celles des étés 2015 et 2022 (période du 1^{er} avril au 31 octobre 2022). Il est donc nécessaire de prendre en compte d'autres facteurs. Ainsi, la baisse de la résistivité en été 2017 est due à un sol plus humide causé par l'absence de prélèvement par les arbres coupés. Il semble que la coupe des arbres en novembre 2016 entraîne, l'été suivant, un sol plus humide, provoquant une résistivité plus basse par rapport aux années précédentes ou suivantes.

En été, les arbres absorbent de l'eau du sol à différentes profondeurs. Après avoir coupé des arbres en novembre 2016, moins d'eau est prélevée car les arbres restants ne compensent pas immédiatement ceux qui ont été coupés. Si le prélèvement d'eau diminue alors que la pluie reste la même, le sol devient plus humide, ce qui se traduit par une résistivité plus faible.

Par ailleurs, dans la zone 3 du profil Sud 100, la diminution de la résistivité médiane en été est moins prononcée que dans les autres zones. Cette différence peut être attribuée à la nature géologique de cette zone de formations détritiques sablo-argileuses (Figure 1), contrairement aux zones 1 et 2 qui se trouvent dans le calcaire santonien. En appliquant la formule d'Archie, il est possible de calculer le rapport de degré de saturation entre l'été 2017 et l'été 2015. Pour les zones 1 et 2, il montre une diminution de degré de saturation

de 1,23 fois la saturation de l'année 2015. Tandis que pour la zone 3, nous avons un rapport de degré de saturation de 1,13.

Au-delà de la diminution des résistivités médianes en été 2017, on constate que pour chacune des trois zones étudiées, la résistivité médiane maximale augmente légèrement de manière constante jusqu'en 2022. Sachant qu'après un abattage, les arbres restants occupent l'espace libéré dans le sol et dans la partie aérienne et que, par suite, leur transpiration augmente provoquant une augmentation de la quantité d'eau prélevée dans le sol, ceci se traduit par une augmentation de la résistivité au fil du temps.

Cependant, il est essentiel de prendre un compte le changement climatique, en particulier l'augmentation de la température. Les mesures électriques sont corrigées de l'effet de la température, ce qui signifie que ce que nous observons sur l'évolution des résistivités n'est pas dû directement à l'effet de la température, mais plutôt à l'effet de l'évapotranspiration. La température augmente, l'évapotranspiration augmente également, ce qui conduit à une teneur en eau plus faible dans le sol. Le graphique (Figure 5) montre l'évolution de la température pour la ville de Gourdon (station MétéoFrance) en moyenne glissante (sur un an). De 2000 à 2014, des variations annuelles comparables sont observées, tandis qu'à partir de 2014, la température moyenne annuelle ne descend plus en dessous de 12,2°C pendant l'hiver. De plus, la température moyenne est en constante augmentation (trait bleu sur la Figure 5). L'augmentation des températures depuis 2014, entraîne nécessairement une augmentation de l'évapotranspiration et un assèchement du massif.

La résistivité n'a pas augmenté dans les mêmes proportions que la température. Ainsi, ces résultats indiquent que les arbres restants ont réagi à l'abattage de leurs congénères sous un délai d'environ deux à trois ans (pour un abattage en novembre). Des études antérieures ont également montré que la dynamique foliaire des peuplements d'épicéas pouvait connaître une réponse significative environ trois ans après un abattage d'environ 40% du peuplement (Omari *et al.*, 2016). Ainsi, les résultats obtenus en géophysique sont conformes à ce qui est attendu en écologie forestière.

Ces deux phénomènes (compensation par les arbres environnants et augmentation de la température) agissent simultanément sur cette période.

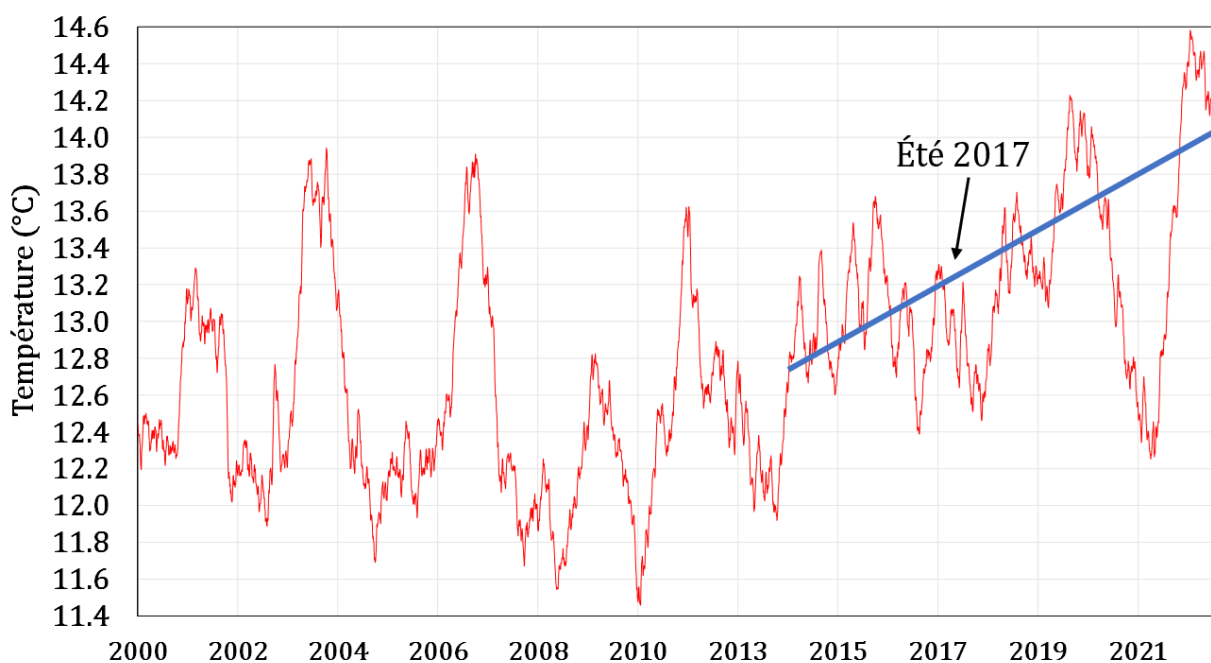


Figure 5 : Température depuis 2000 et son évolution depuis 2015

Afin d'approfondir cette étude, nous avons exploré des niveaux plus profonds que 1,2 m. Nous avons examiné les variations de résistivité non pas, par zone, mais par niveau sur le profil de TRE en dessous des arbres abattus. Les résultats indiquent des valeurs de résistivité médiane plus basses en été 2017 pour les huit premiers niveaux du profil TRE S100 au droit des trois zones étudiées, montrant que l'influence de l'abattage se fait ressentir sur le massif jusqu'à 3,7 m de profondeur. Alors qu'aucune diminution de résistivité n'est observée sur le reste du profil. Cette observation met en évidence que l'influence de la végétation se fait sentir à une profondeur supérieure et pouvant atteindre plus de 3 m de profondeur. Il s'agit d'une profondeur minimale détectable avec cette méthode. De plus, le changement de nature des matériaux géologiques (passage du calcaire santonien au coniacien) peut masquer l'influence racinaire plus profonde.

4.2. Etude de l'influence de l'abattage en lien avec des mesures écophysiologicalues

Afin de comparer ces analyses, nous proposons de travailler à l'échelle du massif à l'aide de mesures de flux de sève. Sur le site de Lascaux, des mesures écophysiologicalues sont effectuées depuis 2017, notamment des mesures de flux de sève. Une carte présentant la localisation de tous les arbres autour du profil S100 (75 au total), avec une distinction entre les pins (17 dans l'aire d'étude) et les chênes (58 dans l'aire d'étude), est présentée sur la Figure 6.

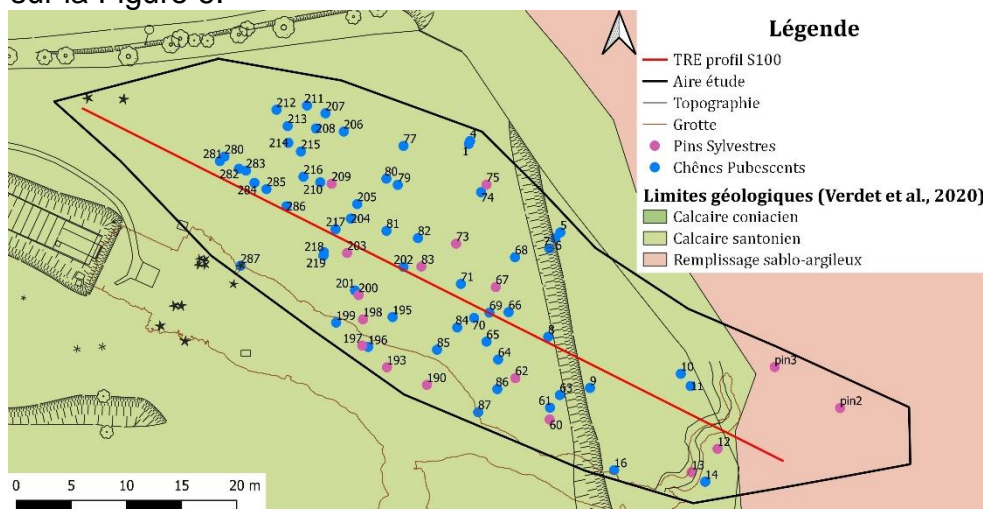


Figure 6 : Localisation des Pins et des Chênes autour du profil Sud 100

Les mesures sont réalisées sur 29 arbres (Pins sylvestres et Chênes pubescent) parmi les 75 équipés à l'aide de capteurs thermiques, en utilisant la méthode de flux de sève développée par Granier (1985). Les capteurs, sont positionnés dans le bois d'aubier (partie hydro-active du xylème) pour estimer la transpiration qui dépend principalement du diamètre de l'arbre et de l'espèce. En utilisant les mesures issues des capteurs, il est possible d'estimer le volume d'eau prélevé par les arbres au cours d'une année, notamment de mai à novembre 2022 (période de transpirations des chênes). Ainsi, il est possible d'estimer les volumes d'eau prélevés pour tous les arbres, en faisant l'hypothèse que à diamètre équivalent, le volume transpiré est le même.

En estimant le volume d'eau prélevé dans cette aire d'étude (délimitée par le trait noir sur la Figure 6). Nous obtenons une valeur d'environ 180 m³ de mai à novembre 2022 ce qui représente 0,13 m³/m². L'abattage des sept pins représente une diminution d'environ 20 m³ d'eau prélevée pendant cette période. Ainsi, suite à l'abattage il y a 20 m³ d'eau en plus dans le massif. Cette estimation du volume d'eau supplémentaire dans le massif

confirme qu'il y a plus d'eau présent dans le massif après l'abattage, et cette variation peut être mesurée grâce à la tomographie de résistivité électrique (TRE).

5. Conclusion

En conclusion, cette étude multidisciplinaire, combinant mesures géophysiques et écophysiologicals, a permis de mettre en évidence l'influence de l'abattage d'arbres sur le comportement hydrique du massif karstique de Lascaux. La baisse de la résistivité au droit des arbres un an après leur abattage est interprétée comme étant due à une augmentation de la teneur en eau. Le retour des valeurs de résistivité semblables à celles des années antérieures à l'abattage se fait rapidement après un an mais plus lentement les années suivantes en raison de la compensation par les arbres restants. Les mesures écophysiologicals corroborent cette conclusion en montrant une augmentation du volume d'eau non transpiré. L'augmentation du volume d'eau dans le massif se manifeste aussi par une augmentation du débit des sources présentes dans la grotte, arrivées d'eau qui participent à la régulation thermique (grotte et massif). Dans le contexte du changement climatique, ces résultats revêtent une importance cruciale pour la gestion forestière et la préservation du site de Lascaux, offrant des perspectives clés pour anticiper les changements futurs et adapter les stratégies de conservation.

6. Références bibliographiques

- Granier, A., 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann. For. Sci.* 42, 193–200. <https://doi.org/10.1051/forest:19850204>
- Guillot, P.-L., Feys, R., Lefavrais-Raymond, A., Platel, J.-P., Lefavrais-Henry, M., 1979. Notice de la carte géologique de la France à 1/50 000 - Terrasson (n°784).
- Liu, Y., Ding, F., Shu, D., Zhao, W., Chui, Y., Hou, Y., Wu, P., 2020. Dominance-caused differences in transpiration of trees in a Karst broadleaved mixed forest. *J. For. Res.* 31, 2083–2095. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01037-1>
- Omari, K., MacLean, D.A., Lavigne, M.B., Kershaw, J.A., Adams, G.W., 2016. Effect of local stand structure on leaf area, growth, and growth efficiency following thinning of white spruce. *Forest Ecology and Management* 368, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.005>
- Salmon, F., Lacanette, D., Lharti, H., Sirieix, C., 2023. Heat transfer in rock masses: Application to the Lascaux Cave (France). *International Journal of Heat and Mass Transfer* 207, 124029. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124029>
- Schoeller, H., 1965. Etude géologique, hydrogéologique et climatologique de la grotte de Lascaux pendant le cycle 1964-1965, (S.I. : s.n.).
- Verdet, C., 2019. Caractérisation multi-échelle du milieu karstique non saturé. Thèse 267.
- 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>
- Xu, S., n.d. Caractérisation de l'environnement karstique de la grotte de Lascaux par couplage de méthodes géophysique, statistique et géostatistique. Thèse 302.
- Xu, S., Sirieix, C., Riss, J., Malaurent, P., 2017. A clustering approach applied to time-lapse ERT interpretation — Case study of Lascaux cave. *Journal of Applied Geophysics* 144, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.07.006>