

| | |
|---------------------------|--|
| Acronyme du projet | SACRES LAC |
| Titre du projet | Sondeur Acoustique, CalcaiRe, Epaisseur Sédimentaire en fond de LAC |
| Porteur du projet | Laurence AUDIN |
| Dispositif | Projet exploratoire et émergent |
| Demande de moyens | <input checked="" type="checkbox"/> Fonctionnement/Investissement <input type="checkbox"/> ADR - Ecole doctorale : Choisissez un élément. <input type="checkbox"/> Post-doctorant <input type="checkbox"/> BIATS/IT |

Description du projet

■ Projets : exploratoires-émergents

Contexte scientifique et/ou technologique, objectifs du projet et positionnement

Localisée dans un secteur isolé du Haut Jura, entre les communes de Saint Claude à l'Est et de Moirans-en-Montagne à l'Ouest, la commune de Villards d'Héria abrite un complexe archéologique Gallo-Romain. Ce site est considéré comme un des sanctuaires majeurs dans le centre est de la Gaule antique et pourtant de nouvelles fouilles commencent à peine après 30 ans sans financement. La fréquentation du site est attestée du 1^{er} avant J.C au III^{ème} siècle Après J.C (Andringa, 2006). La particularité et l'originalité de ce lieu de culte est son implantation double : le site supérieur, sur les rives du Lac d'Antre, le « sanctuaire » et le site inférieur dit « du Pont des Arches », plus bas en altitude, dans le fond du synclinal de l'Héria, à 1km de distance à vol d'oiseau (Figure 1). Une autre originalité pour la France est associée à la présence d'une faille sismique qui traverse ce site de part en part et que l'on soupçonne d'avoir impacté l'occupation et la construction du site pendant l'époque gallo-romaine. Ceci est parfaitement unique en France et très rare en Europe (Poursoulis et al, 2021).

Notre objectif général est de préciser le cadre chronologique d'activité de la faille qui borde le lac d'Antre depuis l'Holocène (Figure 1). L'objectif de ce projet en particulier est d'accéder à l'information sous lacustre dans une zone où tout prélèvement invasif est compliqué et où la bathymétrie ne permet pas de mettre en évidence d'escarpement marqué. La méthode proposée est basée sur l'utilisation d'ondes sonores émises par un sonar et de travailler sur la réflectivité acoustique des couches du fond, dans les premiers mètres d'épaisseur sédimentaire. D'après nos premières mesures tests effectués en 2023, nous faisons l'hypothèse de l'existence d'un escarpement sismique exposant des roches calcaires affleurant à peine à la surface des sédiments lacustres (Figure 2). Il a été très partiellement imagé par un instrument disponible à l'UMR CARTEL (USMB - INRAE) lors d'un test embarqué pendant d'autres manip et semble notablement plus réflectif que les sédiments qui tapissent le fond du lac. Nous souhaitons pouvoir réaliser une cartographie de façon systématique en utilisant un véhicule autonome de surface, le Harle, (Goulon et al., 2021) qui embarquerait cet instrument pour pouvoir démontrer que la trace d'un séisme archéologique est bien présente au fond du lac d'Antre.

Programme archéologique et sismologique : objectif de prospection d'escarpements sub-lacustres Le programme archéologique de recherche sur le sanctuaire des Villards d'Héria (Jura, France) comprend de nombreux bâtiments encore non étudiés et pour partie enfouis entre deux sites d'occupation, dont le périmètre du lac d'Antre dans le Jura. Des indices de déformations et de désordres architecturaux ont été mis en évidence au printemps 2022 sur des murs antiques localisés le long de la faille, suggérant l'impact d'un séisme « archéologique » lors de la construction ou du moins de l'occupation gallo-romaine. S'ils s'avèrent être d'origine sismiques (secoués par le séisme) ou tectoniques (découpés directement par la faille) ces indices témoigneraient soit de mouvements sismiques forts, soit de l'émergence d'une rupture

cosismique en surface enregistrées dans les murs déformés et qui serait aussi enregistrée dans la zone du lac d'Antre. Ce lac est effectivement bordé par la faille suspectée d'avoir produit le séisme gallo-romain et constitue en ce sens un témoin important de l'activité à la fois anthropique et sismique de la région depuis plusieurs milliers d'année.

Contexte sismotectonique en France et failles actives dans le Jura

Dans ce secteur, aucun indice sismotectonique ou instrumental ne témoigne d'une activité sismique notable (Jomard et al., 2017)). De même, le catalogue SISFRANCE ne montre pas de séismes historiques et l'intensité la plus forte ressentie à Villards d'Héria (I=IV) eu lieu en 1971 lors du séisme du Jeurre (intensité épiscopale VII). Pourtant ce site d'étude est localisé sur la prolongation Nord de la Faille de la Montagne du Vuache (Figure 1). Cette faille active est à l'origine, en 1996, du séisme d'Epagny d'une magnitude MI de 5,3 (Thouvenot et al., 1998) proche de la ville d'Annecy (Baize et al., 2011).

Localement, le lac d'Antre traduit la capture tectonique du réseau de drainage post glaciaire (<10 000 ans) et accumule depuis des sédiments et marqueurs de déformation sismique depuis cette période Holocène.

Enjeux en termes d'aléa et de risques sismiques en France et en Europe

La connaissance du contexte sismotectonique, et en particulier pendant la période d'occupation romaine, considérée représentative pour le cycle sismique (>1000 ans) est essentielle. En effet caractériser les failles sources capables de générer des séismes de Mw>5, proches de la surface est la donnée principale pour pouvoir lancer des campagnes paléosismiques et ainsi définir les temps de retour de séismes majeurs. Cette problématique est nouvelle pour l'aléa sismique en France et reprend de l'importance suite aux séismes du Teil en 2019 (Ritz et al ; 2020) et de La Rochelle en 2023. De plus, cette connaissance revêt une importance capitale dans la prévention des risques sismiques en particulier dans un contexte d'urbanisation grandissante, afin de préparer les habitations individuelles, les ouvrages publics tels que hôpitaux, écoles, tissu industriel, ou les installations sensibles.

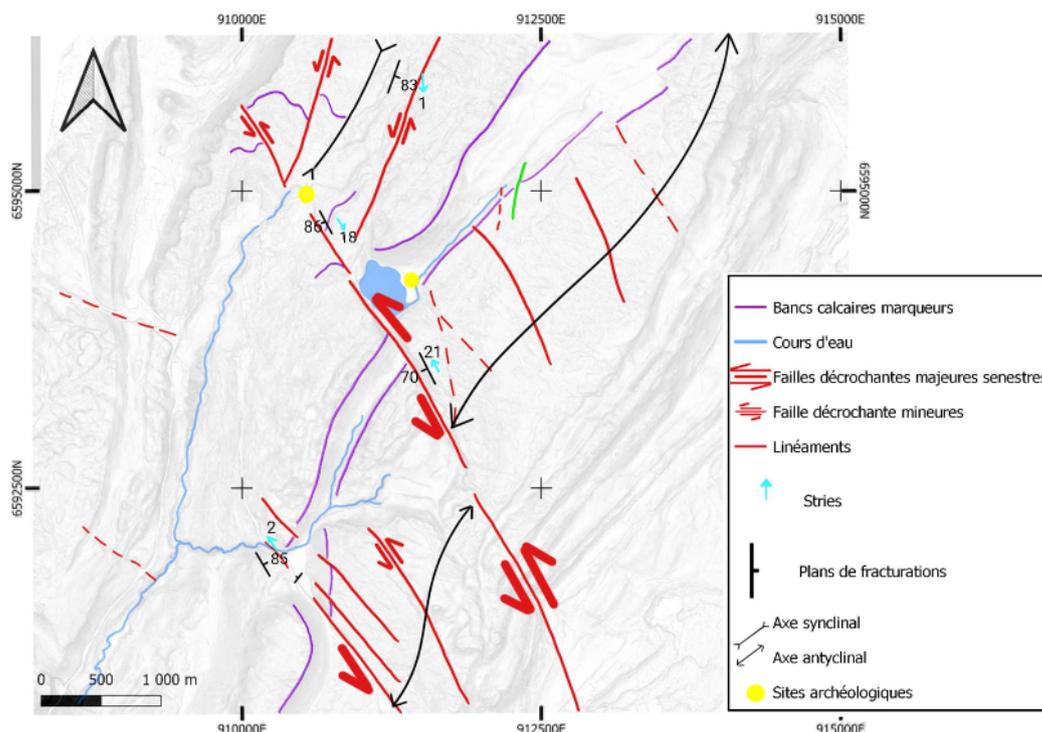


Figure 1 : Carte tectonique de la zone d'étude de Villards d'Héria (M2 T. Lallemand, 2023). En fond, un modèle numérique de terrain à 25cm de résolution. Il est difficile de relier avec précision l'activité sismique très faible constatée par le réseau sismique et les segments de failles observés pour identifier une faille source dans la carte topographique même à très haute résolution comme pour ces données LIDAR 25 cm (CITER). Le lac d'Antre est localisé le long de la faille principale au centre de la carte (cf Master 2 T. Lallemand, 2023)

La zone d'étude se trouve au cœur du massif du Jura, où la densité de population est relativement faible mais il convient de noter que le village et le site antique sont relativement proches de sites sensibles comme le

barrage de Vouglans à l'ouest, le CERN à 30 kilomètres à l'Est, sur la frontière Franco-Suisse, et les sites nucléaires de Creys-Malville et de Bugey à 70 kilomètres au Sud.

- Programme scientifique / Méthodologie et prospection acoustique / Résultats escomptés

La réflectivité acoustique est largement utilisée à des fins d'imagerie pour explorer les environnements sous-lacustres. En utilisant des systèmes sonar de plus en plus performants, les chercheurs mesurent la réflectivité acoustique des surfaces submergées, fournissant des informations détaillées sur la composition du fond des lacs et parfois mêmes des structures immergées. Cette technologie permet la création de cartes sous-marines, facilitant l'identification de formations géologiques, de sites archéologiques ou de suivis biologiques pour l'environnement aquatique. Cette méthode est aussi non invasive permettant ainsi de ne pas perturber le milieu, que ce soit la faune ou les couches sédimentaires.

La méthode qui nous intéresse ici exploite le principe des échos acoustiques générés par l'interface entre différentes couches sédimentaires lorsque des ondes acoustiques les renvoient et les pénètrent. L'intensité des échos renvoyés dépendent directement de la nature du fond, intensité faible pour un sol mou et intensité forte pour un sol dur. Le lac d'Antre étant assez peu profond (profondeur maximale de 10 m), les surfaces sédimentaires et calcaires ont été séparées sur la base de leur niveau de rétrodiffusion ou de l'intensité de l'écho acoustique (Audin et al., 2001). Les données bathymétriques et d'intensité acoustiques de la Figure 2 ont été obtenues lors d'une manip test en juin 2023 avec un sondeur acoustique accroché sur le bord d'un zodiac léger. Ces images pourraient permettre de mettre en évidence les principales structures anthropiques sous lacustres, sous la forme de lignes étroites et continues plus ou moins réfléchives (Figure 2).

En analysant la réflectivité acoustique sur toute sa surface, nous chercherons à confirmer la présence d'un ou plusieurs escarpements de failles dans le lac d'Antre, et de suivre les variations de ce paysage sous-lacustre depuis la berne calcaire (au NE) héritée de la période glaciaire jusqu'aux traces de bâti archéologique, canaux ou d'escarpement tectonique (sur le flanc SO) découpant le fond du lac.

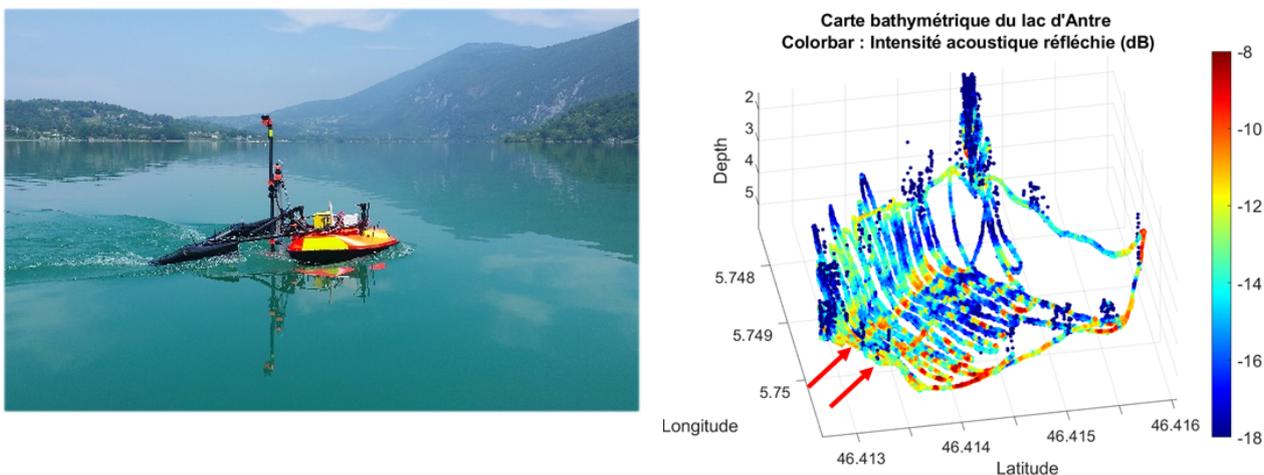


Figure 2 : Le drone HARLE en action, premières données et carte de réflectivité acoustique préliminaire obtenue le long de la trajectoire du bateau. Les flèches montrent les linéations susceptibles de représenter la trace d'un escarpement calcaire dans le fond du lac d'Antre.

Pour ce faire, le sondeur acoustique doit échantillonner de façon très précise (1 point de mesure tous les m^2) la surface du lac de l'ordre de 12 hectares.

Le drone flottant : le HARLE

Nous utiliserons un véhicule autonome de surface, véhicule sans pilote conçu pour opérer de façon autonome dans divers domaines, y compris la surveillance environnementale, la cartographie des lacs et des rivières, la gestion des ressources aquatiques. Le HARLE (Hydroacoustic Autonomous boat for Remote fish detection in LakE) est un véhicule autonome de surface destiné initialement à l'échantillonnage des poissons par les méthodes hydro-acoustiques (Goulon et al., 2021). Le CARTEEL est reconnu depuis de nombreuses années comme un acteur majeur sur l'utilisation des méthodes hydro-acoustiques en lac et l'utilisation du HARLE permet d'accéder à des échelles spatiales et temporelles de haute résolution (Réalis-Doyelle et al.,

2022). Les échantillonnages étant réalisés en mode autonome, on peut ainsi répéter les parcours afin d'améliorer les suivis, temporellement et spatialement (<50 cm). Les composants et langages utilisés peuvent être désormais améliorés grâce aux nombreux développements récents opérationnels dans le monde de la robotique.

Le projet SACRES est basé sur l'interaction des laboratoires ISTERre et CARTEl pour effectuer une cartographie acoustique complète du lac d'Antre et permettre son interprétation en termes de déformation sismique.

Une campagne de mesure en 2024 permettra de réaliser cette cartographie avec le véhicule autonome ajustant les paramètres d'échantillonnage suivants :

- connectivité tablette – sondeur : accès direct facilité et communication à distance nouvelle génération plus rapide et plus fiable ;
- positionnement GPS RTK pour positionnements et trajectoires optimisés.
- optimisation des vitesses de déplacement sur tablette distante pour (1) économiser la batterie du HARLE et (2) travailler plus facilement dans différents milieux : par exemple, possibilité d'être plus rapide en milieu « mou » et plus lent pour les zones où la variabilité de l'intensité acoustique est forte.
- comparaison de la résolution spatiale obtenue par un sondeur acoustique à 120 kHz ou par un profilomètre de fond à 15 kHz prêté par l'Université de Besançon dans le cadre de cette expérimentation.

Imagerie haute résolution des dépôts sédimentaires sur quelques mètres de profondeur (Pinger)

Le Pinger knudsen sub-bottom profiler est un pénétrateur acoustique de sédiment équipé d'un transducteur de 3,5 kHz ou 15 kHz permettant un diagnostic 2D de la structure lithostratigraphique des sédiments lacustres jusqu'à quelques mètres d'épaisseur sous des tranches d'eau de quelques mètres à 15 m. Il permet de caractériser la structure des dépôts en fonction de leur densité-porosité et de mettre en évidence les différentes unités stratigraphiques et éventuelles discontinuités du remplissage sédimentaire (failles, surfaces et morphologies de glissement). Comme le Harle, il intègre un signal GS RTK qui permet une localisation en temps réel de la mesure acoustique et des trajectoires optimisées favorisant une reconnaissance complète du remplissage lacustre. Les données acquises permettront d'établir des corrélations stratigraphiques et chronostratigraphiques entre les profils acoustiques 2D et le carottage de 11m réalisé en 2023, qui a permis échantillonner la séquence holocène du lac. Option envisageable : Basée sur la technologie CHIRP et grâce à la grande ouverture de ses transducteurs, la série Echoes des sondeurs de sédiments [iXBlue](#) fournit des images à très haute résolution des couches de sédiments, des eaux peu profondes moins souvent explorées, avec des capacités uniques de détection d'objets et une pénétration maximale quelle que soit la topographie du fond marin. Il serait intéressant de proposer à cette société privée avec qui nous avons pu discuter de ce type de projet de tester leur matériel en parallèle de l'acquisition PINGER.

Partenariat et cadre des interactions inter laboratoires ISTERre& CARTEl, Association OnnoArchéo et PCR Villards d'Héria

Le Projet collectif de Recherche Villards d'Héria, occupation du territoire, continuité, évolution » renforce sa structure avec la mise en place d'un conseil scientifique et un partenariat avec différents laboratoires de recherche, ce qui permet d'accéder à toutes les informations précédemment acquises, archéologiques et géophysiques concernant le site. Le corpus intégrant des données géologiques archéologiques sera comparé à différentes bases de données existantes dans le cadre des efforts FACT pour les aspects de failles capables en France. En accord avec le service régional de l'archéologie de Bourgogne Franche-Comté, les sondages et tranchées paléosismiques pourront être réalisés au sein du site archéologique pendant les fouilles programmées onshore. Nous disposons d'une couverture Lidar (projet UBFC ISITE-PubPrivLands) sur l'ensemble du site archéologique, à 25 cm de résolution spatiale (Figure 1) qui permettra de comparer à une échelle locale les résultats de la cartographie acoustique offshore et la géomorphologie tectonique onshore.).

Partenariat économique potentiel (contacts pris)

En 2020, un premier contact avait été établi avec la société iXblue pour d'éventuelles interactions, location de matériel à bas coût pour test sur cibles et projets universitaires.

Organisation du projet : échéancier, personnel impliqué et pourcentage du temps prévu, partenariats, utilisation des crédits

- La manip doit se dérouler entre les mois de Mars et d'Avril avant l'installation des nénuphars sur le pourtour du lac.
- Le Harle et le Pinger seront manœuvrés indépendamment.
- Le personnel de chaque institution (PCR VH, U Dijon, ISTerre, CARRTEL) sera présent pour la manip d'acquisition sur une semaine au bord du lac.
- Logement possible au centre sportif de Moirans en Montagne.
- Un étudiant de M2 sera encadré pour le traitement des données (Master STEP, ENS Lyon ou Chambéry).
- En parallèle, sans demandes de financement sur ce projet, des carottes sédimentaires ont pu être échantillonnées dans la partie la plus profonde du lac en 2023 (plus de 11m de carottes), qui permettront peut-être d'apporter des informations supplémentaires sur l'histoire sismique et climatique de ce lac du haut Jura (équipe Besançon, V. Bichet).
- Potentiel test de matériel privé, Gamme echoes des sonderus de sédiments iXBlue en négociation

| Matériel | Mois | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------------------|--------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| HARLE | Acquisitions et traitements | ■ | | | | | | | | | | | |
| | Résultats, interprétations | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | ■ | ■ | |
| | Réunion présentielle pour discussion | | | | | | ■ | | | | | | |
| PINGER | Acquisitions et traitements | ■ | | | | | | | | | | | |
| | Résultats, interprétations | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | ■ | ■ | |
| | Réunion présentielle pour discussion | | | | | | | | ■ | | | | |
| Données couplées | Ecriture d'un papier | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ |

Principaux chercheurs impliqués :

- Philippe Roux – ISTerre / CNRS
- Jean Guillard – CARRTEL / INRAE
- Clément Rautureau – CARRTEL / INRAE
- Vincent Bichet – Chrono Environnement, U. Franche Comté
- Julie Albaric Chrono Environnement - U. Franche Comté
- Amelie Quiquerez- ArteHis, U. Bourgogne
- Rémy Grebot – Projet Collaboratif de Recherche PCR villards d'Heria et Association Onno Archéo
- Stéphane Baize – IRSN
- Marguerite MATHEY - IRSN
- Laurence Audin – ISTerre / IRD
- Théo Lallemand- ISTerre / Doctorant

Co-financements :

Un projet ANR a été déposé en 2023 pour environner la thèse de T. Lallemand et les projets d'archéosismologie proprement dits (PI A. Quiquerez).

Un projet Région Franche Comté, demande incitative (<10 k€), a été déposé en 2023 pour environner la fouille et une partie archéologie proprement dites de scan LIDAR haute résolution des dommages architecturaux (PI A. Quiquerez).

Une demande interne, BQR, demande incitative (5 k€), sera déposée en 2023 pour environner environner la thèse de T. Lallemand (PI L.Audin).

Bibliographie

Andringa, V. (2006). Sanctuaires, pratiques cultuelles et territoires civiques dans l'Occident romain [Review of Sanctuaires, pratiques cultuelles et territoires civiques dans l'Occident romain, par M. Dondin-Payre & M.-T. Raepsaet-Charlier]. *L'Antiquité Classique*, 77, 734-736.

Audin L. et al. ,Fault propagation and climatic control of sedimentation on the Ghoubbet Rift Floor: insights from the Tadjouraden cruise in the western Gulf of Aden *Geophysical Journal International*, 144, 2, 2001, 391–413, <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2000.01322.x>

Goulon C., Le Meaux O., Vincent-Falquet R., Guillard J., 2021.HARLE : an unmanned autonomous surface vehicle to monitor fish population in Lakes. *Limnology & Oceanographic Method*, 19, 2021, 280–292 . <http://doi.org/10.1002/lom3.10422>.

Cuven S., R. Paris, L. Audin, S. Mitra, L. Gielly, and E. Aguirre. Tsunami deposits to reconstruct major earthquakes chronology in Southern Peru. PAGES Special Volume (paleo)-earthquake and -tsunami, submitted 2023.

Poursoulis G., C. Giry and H. Dessales. Archaeoseismology in France: developments and new perspectives for cultural heritage preservation Volume 353, Special Issue S1 (2021), p. 301-323

Réalis-Doyelle E., Goulon C., Cattaneo F., Di Iorio L., Domaizon I., Laurieux A., Morati R., Polblanc A., Rautureau C., Vautier M., Guillard J.. Sismeic airguns' effect on individual fish physiology and fish community behaviour. Présentation projet IMPOPSIS – SIG Genève , 14 Novembre 2022.

Ritz F., Stéphane Baize, Matthieu Ferry, Christophe Larroque, Laurence Audin, Bertrand Delouis & Emmanuel Mathot. Surface rupture and shallow fault reactivation during the 2019 Mw 4.9 Le Teil earthquake, France, *Jean- Communications Earth & Environment*, 27 août 2020. DOI : [10.1038/s43247-020-0012-z](https://doi.org/10.1038/s43247-020-0012-z)

Pour rappel la liste de références est en dehors du décompte de pages.