



## MASTER 1

Mention Géographie et Aménagement  
Spécialité Géographie des changements  
environnementaux et paysagers

### Rapport de stage

Apport de la Géomatique à la compréhension des paléoenvironnements  
lacustres (Lac Pavin et lac de Loures-Barousse)

**GEODE**  
GÉOGRAPHIE DE L'ENVIRONNEMENT

**ARRICAU Victor**

Sous la direction de :

Soutenu le **date**

**Maître de stage : Emmanuel Chapron**

**Enseignant-tuteur : Emmanuel Chapron**

## Résumé :

Les études du lac de Loures-Barousse (piedmont des Pyrénées) et du Pavin (Auvergne) se basent à la fois sur une sismique réflexion à haute résolution ainsi que sur l'analyse de carottes sédimentaires. La combinaison de ces données nous permet de comprendre des moments clés dans l'histoire de chacun de ces lacs. En plus de ces données intrinsèques aux lacs l'emploi des cartes topobathymétriques a permis une meilleure compréhension des environnements lacustres.

Pour le lac de Loures-Barousse l'étude de travaux antérieurs et l'usage des SIG ont permis la reconstruction du paléolac de la Garonne ainsi que l'estimation de son niveau avant et après 15 470 +/- 430 BP. De plus, les campagnes de sismique réflexion et de carottage ont permis d'obtenir une bathymétrie du fond du lac artificiel de Loures-Barousse (lac de gravière) ainsi que la topographie du toit des granulats à la fin de l'exploitation de la carrière. Ces deux horizons ont pu permettre la réalisation d'une carte d'épaisseur sédimentaire des limons laissés principalement lors de la crue de 2013, comme le confirme l'analyse de la carotte LB19-A. Enfin, nous avons pu affiner la zone d'expansion maximale de cette crue de la Garonne en 2013. Cela nous permet de souligner l'influence du comblement du paléolac de la Garonne et d'une moraine frontale du glacier de la Garonne, sur la répartition des zones inondées dans ce secteur des Pyrénées.

Pour le lac Pavin nous avons d'une part pu mettre en exergue grâce à une étude d'XRF de potentiels marqueurs d'éruption limnique. Ensuite, ces études ont permis de remarquer que la forme atypique du glissement AD600 résulte peut-être d'un maillage trop large du secteur. Une grille plus fines lignes sismiques seraient donc ici nécessaire. Enfin, tout comme pour le paléolac de la Garonne il a été possible de calculer et même de cuber le volume d'eau perdu à chaque variation du niveau du lac.

L'objectif global de ce mémoire est de montrer l'importance de coupler l'emploi de la géomatique à des approches sédimentologiques en laboratoire et sur le terrain afin d'optimiser le temps des études et de cerner au mieux les problématiques d'un système lacustre.

## Mots clés :

SIG, Pavin, Lac, Sédimentation, Crue, Garonne, Variation niveau de lac, Eruption Limnique, Paléolac, Géohistoire

Abstract:

The studies of Loures-Barousse lake (piedmont of the Pyrenees) and Pavin (Auvergne) are based on high-resolution seismic reflection and analysis of sediment cores. The combination of these data allows us to understand key moments in the history of each of these lakes. In addition to these lake-specific data, the use of topobathymetric maps has provided a better understanding of lake environments.

For the Loures-Barousse lake the study of previous works and the use of GIS have allowed the reconstruction of the paleolake of the Garona and also an estimation of its level before and after 15 470 $\pm$  430 BP. Moreover, the seismic reflection and coring campaigns resulted in a bathymetry of the bottom of the lake and the bedrock of the artificial lake of Loure-Barousses (gravel pit lake) as well as the topography of the aggregate roof at the end of quarrying and the formation of the gravel pit lake. These two horizons data could have enabled the realization of a sedimentary thickness map of the silts left mainly during the 2013 flood, as confirmed by the LB19-A core analysis. Finally, we were able to fine-tune the area of maximum expansion of this Garonne flood in 2013. This allows us for the sector of Loures-Barousse to emphasize the influence of the filling of the paleolac of the Garonne and a frontal moraine of the glacier of the Garonne, on the distribution of the zones flooded in this sector of the Pyrenees.

For the lake Pavin, we were able to highlight potential markers of limnic eruption by XRF studies. These studies then made it possible to note the atypical shape of the AD600 landslide, which may have resulted from too wide a mesh of the sector. A finer grid seismic lines would therefore be necessary here. Finally, as with the paleolake of the Garona, it was possible to calculate and even to cub the volume of water lost with each variation of the lake level.

The overall objective of this paper is to demonstrate the importance of linking the use of geomatics with sedimentological approach in laboratory and field manipulations in order to optimize the time of studies and to best identify the problems of a lake system.

Je tiens tout d'abord à remercier Emmanuel Chapron pour son suivi et son implication lors de mon stage, mais aussi lors de la rédaction de ce rapport de stage. Son implication dépasse le cadre de ce stage avec son avis et son aide dans la construction d'un projet professionnel en m'ayant permis, entre autres de découvrir de multiples facettes de son travail en tant que chercheur au laboratoire GEODE.

Je tiens également à remercier Johann Blanpied, Hugues Barcet et Émilie Lerigoleur pour leur aide lors de mon travail avec ArcGis. Et enfin Magali Philippe et Margaux Rivière pour leurs explications et aide lors des manipulations en laboratoire.

## Table des matières

1 – Introduction .....	7
1.1 – Objectifs.....	7
1.2 – Présentation de la structure.....	7
2 – Contexte géographique des sites d'études.....	8
2.1 – Le lac de Loures-Barousse : un lac au sein du paléolac de la Garonne.....	8
2.2 – Formation et spécificité du lac Pavin .....	11
3 – Méthodes .....	14
3.1 – Présentation des logiciels et méthodes utilisés .....	14
3.2 – Intégration de données topographiques et bathymétriques.....	16
3.3 – Géométrie des remplissages sédimentaires lacustres .....	19
3.4 – Nature des remplissages sédimentaires .....	21
3.5 – Délimitation du bassin versant hydrographique du lac Pavin.....	24
4 – Résultats et Interprétations .....	26
4.1 – Lac de Loures-Barousse .....	26
4.2 – Pavin .....	36
Conclusion.....	44
Bibliographie.....	46
Annexes .....	50

## Table des figures

Figure 1 : Carte des bassins versants français de l'agence de l'eau avec la localisation du lac de Barbazan et Loures-Barousse (photographie de gauche) et du lac Pavin (photographie de droite) ; a) Lac de Loures-Barousse, b) Lac de Barbazan, c) Montchal, d) Lac Pavin .....	8
Figure 2 : Carte de localisation des forages, du point de carottage ainsi que de la coupe topographique (Figure 11).....	10
Figure 3 : Cartons de localisation a) carte de l'ouest de l'Europe, b) carte de la zone des volcans d'Auvergne, c) zone étudiée d'après Meybeck, 2016 .....	11
Figure 4 : Stratification verticale des eaux du lac Pavin, Assayag et al, noter la présence sources subaquatiques vers 50 m de profondeur. ....	12
Figure 5 : Carte bathymétrique avec les profils sismiques 12 kHz et l'emplacement des carottes mentionnées dans ce travail.....	14
Figure 6 : Schéma d'une campagne de bathymétrie multifaisceaux (d'après le site ifremer).....	16
Figure 7 : Principe de la cartographie sismique réflexion de type « chirp », Chapron, 2007 .....	17
Figure 8 : Interface EDIFISegy montrant la totalité des profils sismiques géoréférencés .....	18
Figure 9 : Interface roche-sédiment pointée sur EDIFISegy sur un profil 14,1 kHz, il en va de même pour l'interface eau-sédiment .....	18
Figure 10 : Carte de la topographie actuelle et la géomorphologie du toit du rocher sous le remplissage du paléolac de la Garonne, obtenu grâce à l'article Perrouy et al, 2015 .....	20
Figure 11 : Coupe topographique de la zone étudiée avec l'emplacement des carottes, localisé sur la figure 2 .....	21
Figure 12 : Bassin versant hydrologique du lac Pavin, Chassiot, 2018.....	24
Figure 13 : Carte des formations quaternaires du secteur de Loures-Barousse et de Barbazan, modifiée d'après Andrieu et al., (1988).....	26
Figure 14 : Carte de la vallée de la Garonne avec les différents niveaux du paléolac et les deux sites de forages .....	27
.....	29
Figure 15 : Cartes du substrat rocheux et de la bathymétrie du lac de Loures-Barousse obtenues à partir des données sismiques collectées en 2017 et 2019 .....	30
Figure 16 : Carte d'épaisseur du remplissage sédimentaire lacustre dans le bassin de Loures-Barousse .....	31
Figure 17 : Susceptibilité magnétique et Spectrométrie de la carotte LLB19-A.....	33
Figure 18 : Zone d'expansion de la crue en 2013 .....	34
Figure 19 : Modification carte de Sturma et al, 2017 élargissant la zone du bassin versant de la Garonne touchée par la crue de 2013 .....	35
Figure 20 : Coupe du creux de Soucy du Nord au Sud, montrant la similitude de niveaux entre le creux de Soucy et le lac Pavin, Meybeck 2016.....	36
Figure 21 : Coupe géologique du complexe Pavin-Montchal avec le creux de Soucy, modifié d'après les travaux de Meybeck 2016 et Glangeaut 1916.....	37
.....	38
Figure 22 : a) Limites des différents bassins versants entourant le lac Pavin, b) Cartes des pentes du lac Pavin.....	38
Figure 23 : Carte du Bassin versant topographique et hydrologique du lac Pavin.....	38
Figure 24 : Carte spectrale Pav10-B, dérivée des longueurs d'onde 525nm et 445nm : marqueur de la goethite .....	40
Figure 25 : Carte spectrale Pav10-B, susceptibilité magnétique et teneur en titane, potassium et strontium suite à l'XRF du CEREGE.....	40
Figure 26 : Ensemble des carottes contenant des traces de dépôt d'éruption limnique et carte d'épaisseur.....	42

# 1 – Introduction

## 1.1 – Objectifs

On peut résumer le risque par la formule suivante : Risque = aléa multiplié par la vulnérabilité d'un espace donné (Géoconfluence). L'aléa étant l'évènement touchant un espace donné (évènement naturel ou non) et la vulnérabilité est le niveau de prévisibilité de cet évènement et ses conséquences sur l'anthroposphère. La notion de risque recouvre donc à la fois le danger potentiel de catastrophe et la perception qu'en a la société, l'endommagement potentiel, comme celle de l'endommagement effectif. L'objectif de l'ensemble de ce travail est donc d'évaluer les risques pouvant toucher deux lacs : le lac artificiel de Loures-Barousse et celui naturel du Pavin. Pour le lac de Loures-Barousse, on s'intéresse au risque de crue, à la sensibilité de ce site aux activités humaines et aussi à la gestion des conséquences de la crue de 2013 par l'Homme. Comme on connaît mal le comportement des lacs artificiels de type gravière et sa résilience face à la gestion du risque par l'Homme il est intéressant d'étudier les conséquences du traitement dépôt de limon post-crue sur l'écosystème de ces lacs. Pour le lac du Pavin, on s'inquiète de l'écosystème du lac puisque l'Homme fragilise ce dernier avec l'emploi d'intrant malgré la mise en place d'un contrat territorial des lacs de la tête de bassin de la couze Pavin (Guimard, 2017). Pour le Pavin, les éruptions limniques mentionnées par différentes études (partie 2.2 de ce rapport) posent aussi un risque important pour l'attractivité touristique du lieu. Pour traiter ces diverses thématiques, nous allons utiliser la topobathymétrie afin de comprendre les dynamiques des bassins versants (naturel ou artificiel) grâce à des campagnes de carottage et de sismique réflexion faites en amont de ce stage (dès 2008 pour le Pavin et en 2017 pour le lac de Loures-Barousse) et lors de mon stage. Cette méthode a donc pour but de comprendre la sensibilité de ces lacs à un risque extrême : crue ou éruption limnique.

## 1.2 – Présentation de la structure

Le laboratoire GEODE (Géographie de l'Environnement) est une unité mixte CNRS (INEE) et l'Université de Toulouse Jean Jaurès qui est orienté sur l'étude des paysages et de l'environnement dans une perspective interdisciplinaire et multi temporelle, allant de la rétro-observation des processus naturels et socio-environnementaux à l'établissement de modèles prospectifs. Le laboratoire est donc multidisciplinaire et associe des spécialistes en géographie de l'environnement, des géohistoriens, des géologues, des écologues et paléoécologues, des archéoécologues, ainsi que des spécialistes en télédétection et modélisations spatiales ou

multiagents. Le laboratoire se divise en trois axes qui sont : PALéoenvironnements, Écologie Historique et SOCIétés (PALEHSOC) ; Enjeux environnementaux et paysagers des SOCIétés Contemporaines (ESOC) et Environnement, développement durable : éducation et enseignement (E2D2E). Ce stage s’est réalisé au sein de l’axe 1 du laboratoire (PALEHSOC) sous la direction d’Emmanuel Chapron. Les données utilisées durant ce stage ont notamment été collectées dans le cadre du projet GALAC financé en 2017 et 2018 par le programme de la Zone Atelier PYGAR (Pyrénées Garonne) du CNRS.

## 2 – Contexte géographique des sites d’études

Les deux lacs étudiés ici ont pour particularité de se trouver aux antipodes du bassin versant Adour-Garonne avec un lac artificiel (lac Loures-Barousse) proche de la source de la Garonne (créé au début des années 2000) dans le piedmont des Pyrénées et le second qui est un maar (lac de cratère) naturel en Auvergne à la frontière avec le bassin versant Loire-Bretagne. (Lac Pavin) tous les deux dans une vallée glaciaire.

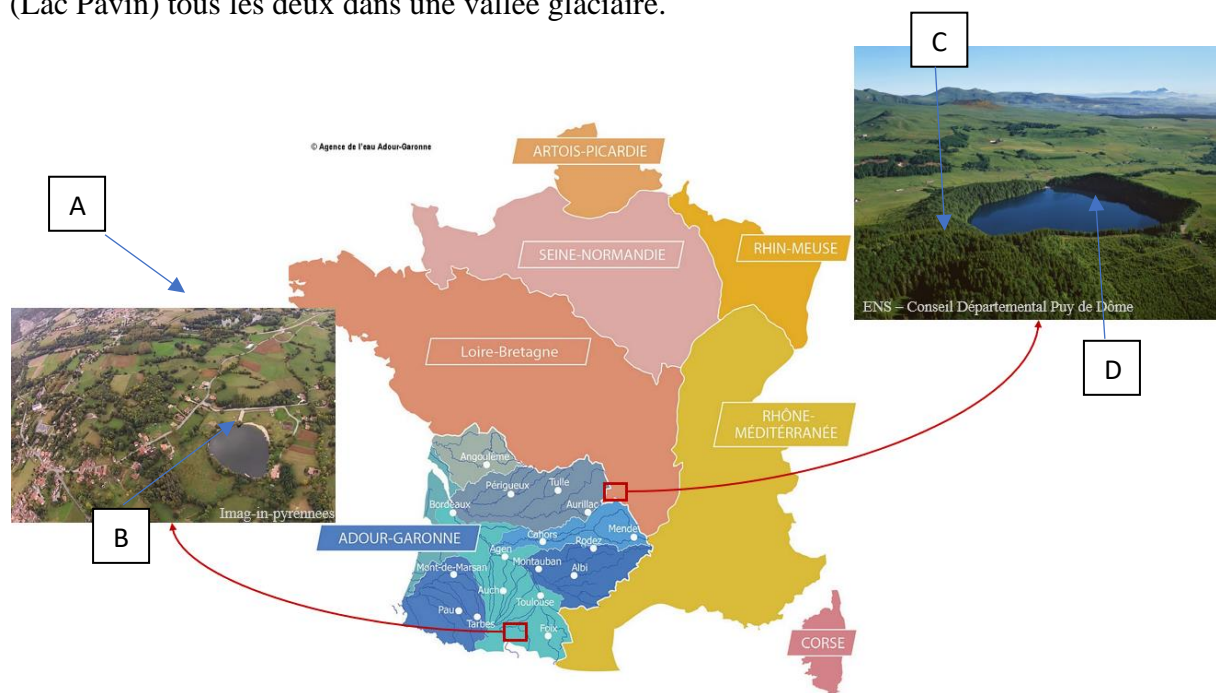


Figure 1 : Carte des bassins versants français de l’agence de l’eau avec la localisation du lac de Barbazan et Loures-Barousse (photographie de gauche) et du lac Pavin (photographie de droite) ; a) Lac de Loures-Barousse, b) Lac de Barbazan, c) Montchal, d) Lac Pavin

### 2.1 – Le lac de Loures-Barousse : un lac au sein du paléolac de la Garonne

Les lacs de Barbazan et de Loures-Barousse sont localisés à l’est du département des Hautes-Pyrénées, au sein de la région Occitanie. Ils sont situés au piedmont des Pyrénées à 451 mètres d’altitude pour Barbazan et 437 mètres pour le site de Loures-Barousse. Ces deux lacs se situent à proximité du lit majeur de la Garonne, ce qui fait la spécificité de ce secteur.



Barbazan se situe sur des terrasses glaciolacustres en rive droite et Loures-Barousse sur des terrasses fluviolacustres en rive gauche. Ces lacs de vallée montagneuse sont gérés par deux petites communes rurales, la commune de Barbazan et celle de Loures-Barousse. Les deux territoires se trouvent dans la vallée de la Garonne formée lors de la dernière glaciation suite au comblement progressif du paléolac de la Garonne dont le lac de Barbazan est l'unique vestige.

Le paléolac de la Garonne résulte de l'alternance des périodes glaciaires et interglaciaires. En période glaciaire les fortes précipitations de neiges et les faibles températures sont propices à la formation et développement des glaciers. Le recul des glaciers dû aux températures plus fortes lors de la période interglaciaire crée un surcreusement qui crée des vallées glaciaires. Un lac proglaciaire se forme en avant des glaciers, généralement à la suite du recul de ces derniers, il se situe entre le glacier et la moraine frontale.

L'érosion du bassin versant entraîne une avancée du delta dans le lac et donc l'enrichi progressivement en matière organique jusqu'à son comblement, ce sont des sédiments fluvioglaciaires. Ce comblement du lac par les alluvions fluviales de la Garonne permet ensuite le développement de la plaine alluviale de la Garonne en amont des moraines frontales. (Perrouy et al., 2015 ; Zouzou, 2017)

Le lac de Loures-Barousse date de la fin du XXème siècle. Il fut créé suite à l'exploitation des granulats commencée en 1993 qui a modifié le lit de la Garonne. L'emplacement de cette gravière est dû aux fluctuations et aux déplacements de la Garonne dans son lit entraînant le dépôt de matériel fluvial. La ressource de granulats est une ressource stratégique très demandée puisqu'elle est la seconde ressource naturelle la plus utilisée au monde. Les granulats représentent près de 60 % des matières prélevées sur le territoire français. Après une hausse de près de 17 % entre 1992 et 2007, la production de granulats a décliné d'environ 22 % depuis, l'activité dans les secteurs des travaux publics et de la construction s'étant contractée (Zouzou, 2015). Le site de l'ancienne carrière de granulat est depuis géré par la mairie et a été transformé en un site récréatif centré autour du lac qui a rempli l'ancienne gravière (activités de pêche, pique-nique, accrobranche, parcours sportif, etc..) au début des années 2000.

De plus, le fait que ce site soit soumis au risque de crue de la Garonne, comme en 2013, lui confère un statut d'archive environnementale riche qui traduit l'évolution du paysage. En effet, la Garonne est un fleuve historiquement actif, les premières crues extraordinaires documentées de la Garonne datent de 1875 (Antoine, 1989). Ces crues récurrentes s'expliquent

en partie par l'emplacement de ses sources en altitude. Le fleuve est donc soumis à un régime nivo-pluvial comme un grand nombre de cours d'eau dans les massifs montagneux. La crue de 2013 dont il est question ici s'explique par de fortes chutes de neige en hiver : 2 mètres en moyenne à 1500 mètres d'altitude (quatre fois plus que la moyenne) et plus de quatre mètres à 2500 mètres d'altitude. À cela s'ajoute un printemps avec des températures plus basses que la normale retardant la fonte des neiges sur les massifs. Des précipitations tombées sous forme de neige à haute altitude ont contribué à reconstituer un manteau neigeux important et à le maintenir. À la mi-juin, les fortes températures en haute altitude ont augmenté la fonte de jour en jour, donnant des débits élevés précurseurs de cette crue exceptionnelle. De fortes précipitations jusqu'en altitude ont déclenché une fonte massive du manteau neigeux et une crue exceptionnelle. Cette crue a occasionné de nombreux dégâts tels que la destruction de ponts et de campings qui n'ont pas pu rouvrir comme le camping des Bords de la Garonne à Loures-Barousse (Sturma et al., 2017). Les limons déversés par la crue sur le parc entourant le lac ont été rassemblés sous forme d'un monticule au sud-est du lac. Une grande partie des limons de la crue de 2013 déposés sur ce secteur autour du lac a cependant été déversée dans le lac. Un des objectifs de ce travail est de voir si une telle gestion de cet événement de crue a pu modifier ou pas l'équilibre de cet écosystème artificiel.

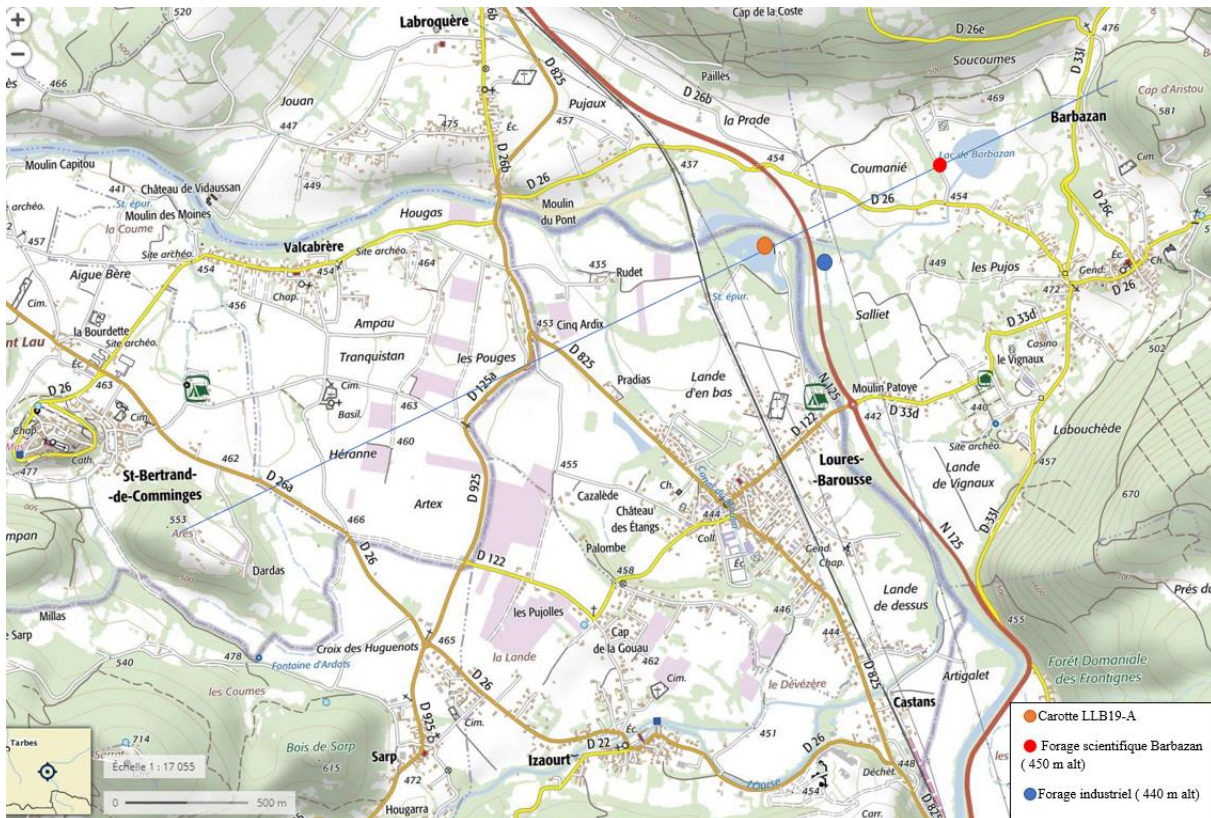


Figure 2 : Carte de localisation des forages, du point de carottage ainsi que de la coupe topographique (Figure 11)

## 2.2 – Formation et spécificité du lac Pavin

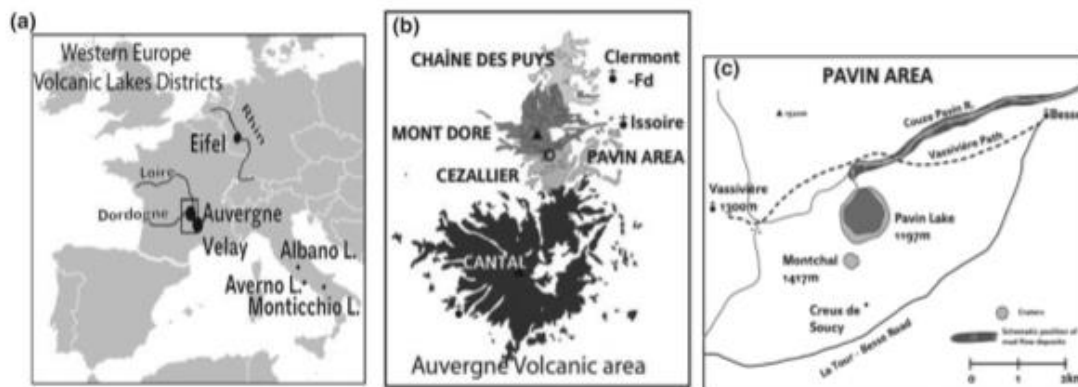


Figure 3 : Cartons de localisation a) carte de l'ouest de l'Europe, b) carte de la zone des volcans d'Auvergne, c) zone étudiée d'après Meybeck, 2016

Le lac Pavin est situé à 1197 mètres d'altitude, au sein des montagnes d'Auvergne dans le département du Puy-de-Dôme. Il se trouve à une cinquantaine de kilomètres au sud de Clermont-Ferrand. Ce lac a une superficie de 0,44 km<sup>2</sup> et une profondeur de 92 mètres. Il est entouré de pentes raides, entre 28 et 39 %, boisées qui sont les rebords du cratère obtenus lors de la formation du Pavin (il y a environ 7000 ans cal BP) peu de temps après l'éruption du Montchal qui forma un cône de scories ayant été partiellement préservé par l'éruption du Pavin (Gourgaud et al. 2016). Le lac possède un exutoire au nord (annexe 1 a), et à son extrémité sud se trouve le Montchal, que l'on voit au premier plan de la photographie (figure 1). Ce type de lac provenant du remplissage d'un cratère volcanique d'éruption s'appelle un maar. De plus, la vallée au nord de ce maar, la Couze Pavin, est une vallée glaciaire. Il est à noter que ce paysage est mouvant, évolutif, dû aux changements de niveau du lac Pavin ; les deux baisses majeures ont été datées vers AD600 (Chassiot, 2016, 2018) et à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle (Meybeck, 2016). L'exutoire du lac, aussi appelée « la gorge terrible » annexe 1 b, (Meybeck, 2016), résulte probablement d'un tremblement de terre daté vers AD 600 (Chassiot et al, 2016, 2018 ; Chapron et al. Accepté) ayant provoqué une rupture d'une partie du cratère puis entaillé son enceinte au niveau de son exutoire. Cette crise a provoqué une chute abrupte du niveau du lac de 9 mètres (Chassiot et al, 2016).

Dans sa partie la plus profonde — entre 60 mètres à 92 mètres — les eaux du lac sont anoxiques et ne se mélangent jamais avec les eaux de « surface ». Il s’agit ici des eaux au-dessus du chemioclina qui est à 60 mètres de profondeur (Assayag et al 2008). Ce type de phénomène lacustre est extrêmement rare et est appelé : un lac méromictique (figure 4).

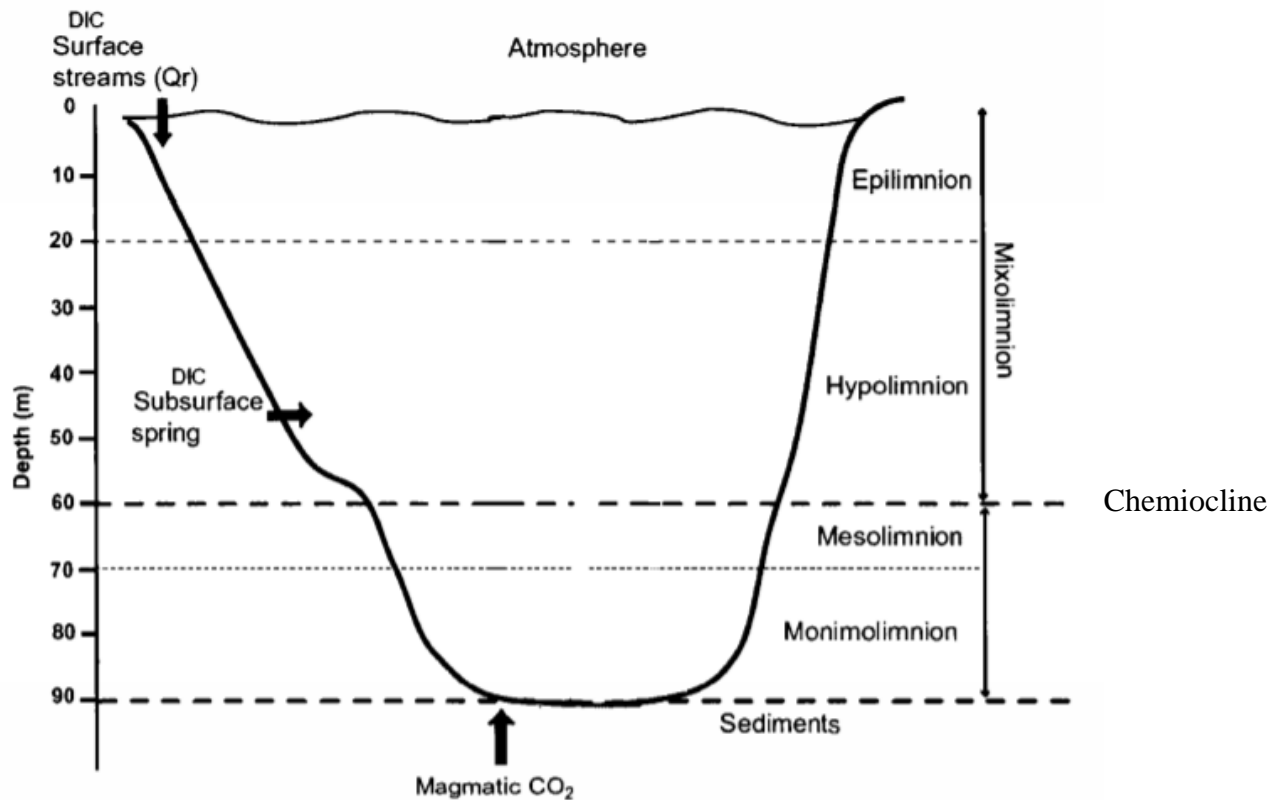


Figure 4 : Stratification verticale des eaux du lac Pavin, Assayag et al, noter la présence sources subaquatiques vers 50 m de profondeur.

Enfin, l’une des dernières spécificités du lac Pavin est qu’il fait l’objet de nombreux récits fantastiques (Meybeck 2016). Il est fréquent que les plans d’eau véhiculent des histoires, des mythes dus à la nature ambiguë de l’eau dans les diverses croyances et mythes. En effet, l’eau est associée à une source de vie, promesse de la vie, mais c’est aussi l’élément qui oscille entre monde des humains et du surnaturel, source de vie ou de mort et de malédiction (majoritairement lié à l’eau stagnante), pureté ou perfidie. Cette idée est présente depuis l’Antiquité avec Platon (428-328 av. JC), qui considérait que l’eau provenait du Tartare qui est à la fois une vision des Enfers où les titans sont emprisonnés et une immense masse liquide présente au centre de la terre qui par mouvement de montées et de descentes remplissait les cours d’eau. Il semble donc logique qu’un lac de 92 mètres de profondeur, souvent qualifié de « Lac sans fond », ait engendré moult légendes ; nonobstant l’une d’entre elles semble plus tenace que ses consœurs, celle d’un lac capable de provoquer des orages (Meybeck, 2016). En effet, il est documenté (Meybeck, 2016) des « bruits d’orages » et une couleur « orangée » de

l'eau. Ce phénomène mis en lumière par Meybeck est connu sous le nom de la Trombe de 1785 (Meybeck, 2019), et il s'apparenterait à une éruption limnique. Ces éruptions limniques sont rares et peu documentées, la plus étudiée est celle du lac Nyos en août 1986 ayant tué 1746 personnes au Cameroun (Tchindjang, 2018). C'est donc pour toutes ces raisons que le lac Pavin a été étudié sur divers aspects : limnologie, géochimie, biologie, biochimie, paléolimnologie et sédimentologie (T. Sime-Ngando et al. 2016)

En 2007 la Direction Départementale de l'Équipement Puy-de-Dôme demanda une étude approfondie du lac Pavin afin de comprendre et d'évaluer les risques liés aux glissements de terrain et au débordement des eaux du lac pouvant mettre en péril le tourisme de la zone. Dans ce cadre, de nombreux travaux ont été réalisés sur ce lac : le 10 juin 2008 une bathymétrie multifaisceaux a été réalisée avec un sondeur 240 kHz et réalisée par la société MESURIS.

Les travaux de Chapron et al. (2010) permettent de coupler des données sismiques haute résolution (3,5 kHz) afin de localiser un carottage (PAV8) en limite du plateau subaquatique visible à proximité de l'exutoire (figure 5), ce travail a été réalisé en partenariat avec des chercheurs Belges. Une nouvelle campagne (Chapron et al., 2012) de données sismiques très haute résolution (12 kHz de type « Chirp », figure 7) en collaboration avec des scientifiques québécois a permis d'affiner les corrélations sismiques et les carottes afin de préciser l'histoire des instabilités gravitaires qui ont impacté le lac Pavin (Chassiot et al. 2016, Chapron et al. 2016). À partir de ces multiples carottages réalisés sur le plateau il a été possible de préciser l'ampleur et l'impact de deux crises majeures qu'a connu le lac Pavin en AD 600 et AD 1300 (Chapron et al., 2016 chapitre 22). Sur la carotte Pav08-P1 Chassiot a notamment identifié deux dépôts d'éruptions limniques historiques : en 1929 et en 1785 à partir de la couleur des dépôts lacustres (spectrocolorimétrie) et des datations C14, annexe 2 (Chassiot et al., 2016 et 2018).

L'objectif de ce travail sur le Pavin est d'une part de confirmer la présence de dépôts historiques d'éruptions limniques documentés par Chassiot et al. (2016) dans une carotte du lac Pavin (PAV08) à partir de l'analyse de carottes voisines : Pav09-C1, Pav09-C2, Pav09-C3, Pav09-C4, Pav09-P1 et Pav10-B (figure 5). D'autre part en compilant les données topobathymétriques disponibles au Pavin, les profils sismiques et les analyses des carottages il s'agira de préciser la présence et l'abondance des dépôts d'éruptions limniques dans la zone du plateau et d'autre part de définir les limites du bassin versant hydrologique du lac Pavin.



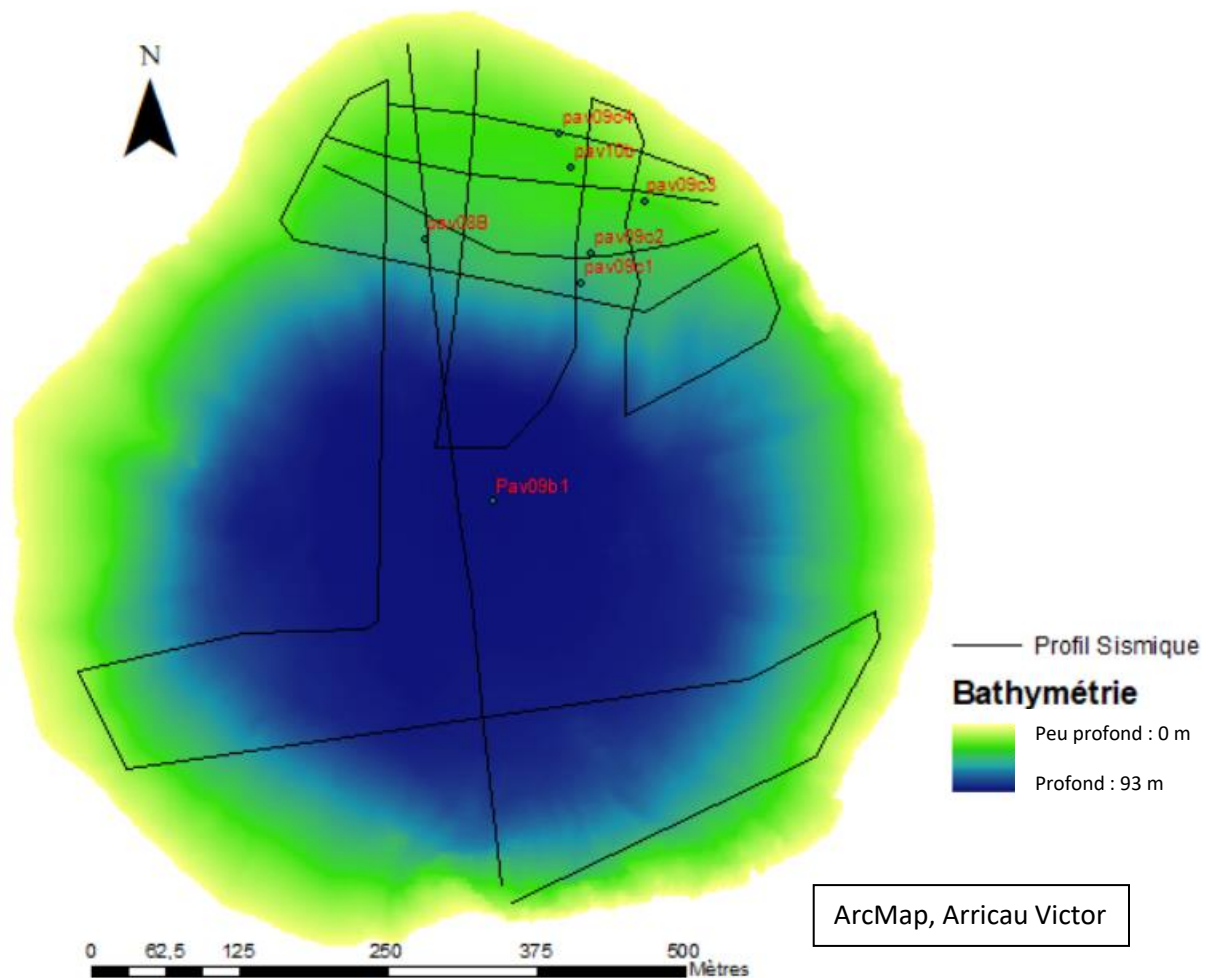


Figure 5 : Carte bathymétrique avec les profils sismiques 12 kHz et l'emplacement des carottes mentionnées dans ce travail

### 3 – Méthodes

#### 3.1 – Présentation des logiciels et méthodes utilisés

ArcGIS est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques. Ce SIG développé en 1999 par la société américaine Esri regroupe un ensemble de logiciels dont le plus utilisé dans ce travail est ArcMap, est écrit en Visual C++ et Python et fonctionne sur Linux et Microsoft Windows.

QGIS quant à lui voit sa première version publiée en juillet 2002 par une équipe indépendante, tout comme ArcGIS il est écrit en C++ et Python, mais sont supportés par beaucoup plus de systèmes d'exploitation. Le projet porte d'abord le nom de SourceForge à sa sortie puis de Quantum GIS jusqu'en septembre 2013. QGIS fait partie des projets de la Fondation Open Source Geospatial. Le logiciel est intégré à la liste des logiciels libres

préconisés par l'État français dans le cadre de la modernisation globale de ses systèmes d'information (S.I.).

Enfin le projet EDIFIS développé entre 2012 et 2016 par Emmanuel Chapron au sein des laboratoires ISTO (Orléans, 2012-2014) et GEODE (2014-2016) possède trois objectifs : (i) Mise au point d'une méthode d'acquisition de données sur la morphologie, la géométrie et l'hétérogénéité des remplissages sédimentaires en amont d'une retenue sur cours d'eau (adaptation d'un sondeur acoustique de sédiments (sismique réflexion à haute et résolution) à des tranches d'eau faibles) ; (ii) standardisation de la bancarisation et du traitement des données numériques géo référencées ; et (iii) état de l'art sur la prise en compte du risque lié à la remise en suspension de sédiments pollués. (Chapron, 2016). En partenariat avec le bureau d'étude GéoHyd-Antéa Groupe basé à Orléans-La Source et les laboratoires ISTO et GEODE, le logiciel EDIFISegY a été mis au point pour lire les données du sondeur de sédiment (format SEGY) et de pointer des horizons clés imagés sur les sondages acoustiques (ex. : bathymétrie, ou limite sédiment-substrat rocheux) pouvant être exportés au format shapefile et importé dans un SIG pour générer des cartes géo référencées des remplissages sédimentaires subaquatiques. (Chapron 2016).

Le sondeur acoustique multifaisceaux est généralement monté sous la coque d'un navire, permettant de mesurer depuis la surface la profondeur d'eau en plusieurs points simultanément Figure 6. Il fonctionne à mesure que le navire se déplace, permettant ainsi de « balayer » le fond des océans, sur une largeur pouvant aller jusqu'à 20 km par 5 000 m de fond. Pour mesurer la profondeur d'eau, le sondeur va émettre une onde acoustique qui va se propager dans l'eau, être réfléchi par le fond, et repartir vers la surface. Il va ensuite enregistrer cet écho et mesurer le temps qu'a mis l'onde pour parcourir cet aller-retour fond-surface. Avec cette mesure de temps de parcours, et connaissant la vitesse de propagation des ondes acoustiques dans l'eau, le sondeur est capable de calculer la distance qu'a parcouru l'onde, et donc la profondeur.

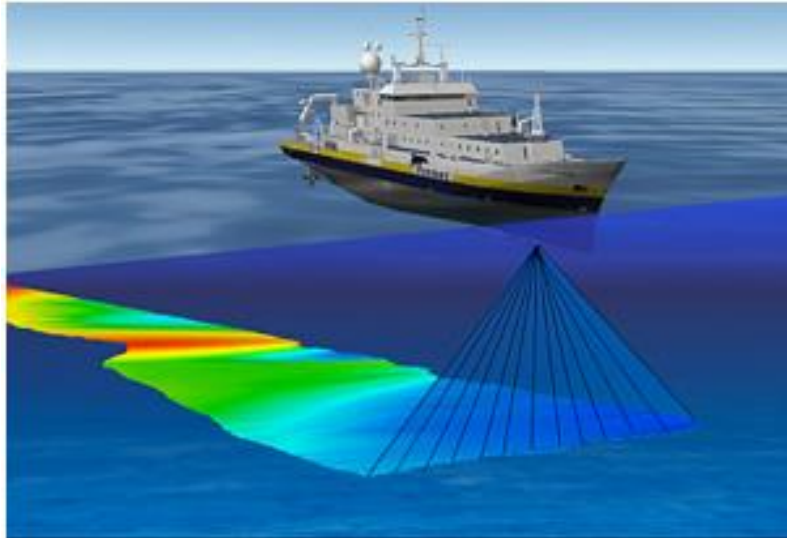


Figure 6 : Schéma d'une campagne de bathymétrie multifaisceaux (d'après le site ifremer)

### 3.2 – Intégration de données topographiques et bathymétriques

Les Modèles Numériques de terrains utilisés pour ce travail proviennent de l'IGN et ont une résolution de 5 mètres pour les dalles du secteur de Loures-Barousse et une résolution de 1 mètre pour le secteur du lac Pavin.

Ici, il sera question de développer la méthode cartographique utilisée pour obtenir et compiler ces Modèles Numériques de Terrain. Tout d'abord, on définit le système de projection, Lambert-93, dans les propriétés du bloc de données puis on importe un fond de carte depuis ArcGis Online afin de faciliter la sélection des dalles du Modèle Numérique de Terrain fourni par l'IGN préalablement téléchargées. Une fois les dalles choisies et importées nous allons faire une mosaïque de raster afin de n'avoir qu'une seule grande dalle. Ce processus permet d'éviter une séparation franche des dalles. Pour cela il faut créer un nouveau raster qui va accueillir la fusion, on utilise la fonction *créer un jeu de données raster* qui se situe dans *Outils de gestion de données, Raster, Jeux de données raster*. Une fois le nouveau raster créé on utilise la fonction *Créer une Mosaïque* dans *Mosaïque* et l'on incrémente les rasters à fusionner, le raster de sorti nouvellement créé en rentrant manuellement l'extension .tif. On obtient donc une seule dalle regroupant nos Modèles Numériques de Terrain.

L'intégration des données bathymétriques peut se faire de deux façons distinctes :

Pour obtenir la bathymétrie et le substrat du lac de Loures-Barousse, nous avons utilisé la sismique réflexion puisqu'elle permet de visualiser la géométrie des remplissages grâce à la propagation des ondes acoustiques. Cette méthode est plus ou moins efficace en fonction du



sédiment, en effet un sédiment riche en gaz absorbera les ondes dénaturant ainsi le signal reçu figure 7. (Chapron et al., 2007 et 2010).

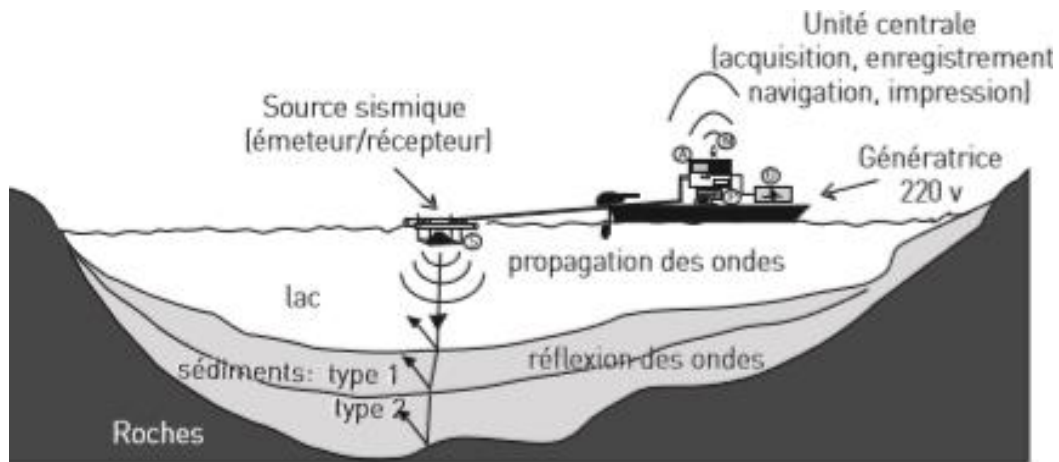


Figure 7 : Principe de la cartographie sismique réflexion de type « chirp », Chapron, 2007

Pour l'acquisition des profils sismiques nous avons utilisé un appareil de sismique réflexion KNUDSEN<sup>TM</sup> émetteur-récepteur de type « Chirp » émettant du 4, 14 et 200 kHz. La campagne de collecte de données sismiques de 2017 a employé une fréquence de 4 kHz et 200 kHz et celle de ce stage en mai 2019 les fréquences 14 kHz et 200 kHz. Les hautes fréquences, 4 et 14 kHz, permettent d'observer la géométrie du remplissage et le remplissage sédimentaire accumulé dans le lac de gravière, et la très haute fréquence (200 kHz) sert à déterminer l'interface eau-sédiment, utilisée pour produire la carte bathymétrique. Le système KNUDSEN<sup>TM</sup> fonctionne avec un ordinateur portable qui permet d'observer en temps réel l'acquisition des données. Il est couplé à un GPS pour se repérer sur le lac et géo localiser chaque tir sismique figure 8. L'ensemble de ce dispositif est transporté par une petite embarcation, propulsée par un moteur électrique, annexe 3 (Zouzou, 2015).

Ensuite, le logiciel EDIFISegy permet d'importer des profils sismiques géolocalisés afin de les visualiser et de tracer les horizons clés profil par profil : figure 9. Une fois ces horizons tracés, il est possible de les exporter en shape file afin de les utiliser dans ArcMap. Ce logiciel permet de calculer les sommets des polygones 3D dans la table attributaire, puis de faire une interpolation pour obtenir un Modèle Numérique de Terrain avec la fonction *Topographie* en saisissant exclusivement les paramètres d'acquisition des variables Z qui sont des points d'élévation.

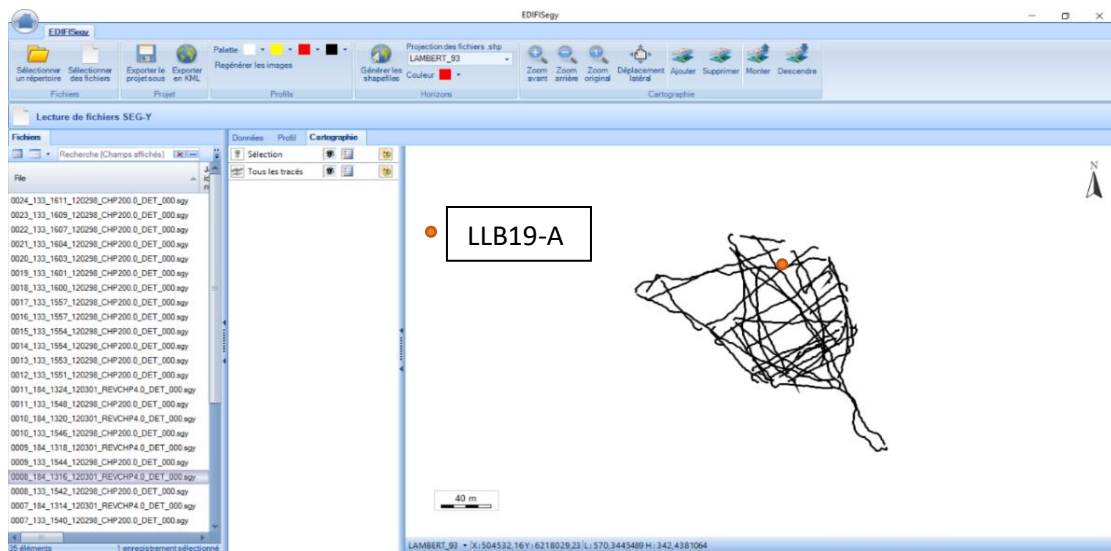


Figure 8 : Interface EDIFSegy montrant la totalité des profils sismiques géoréférencés

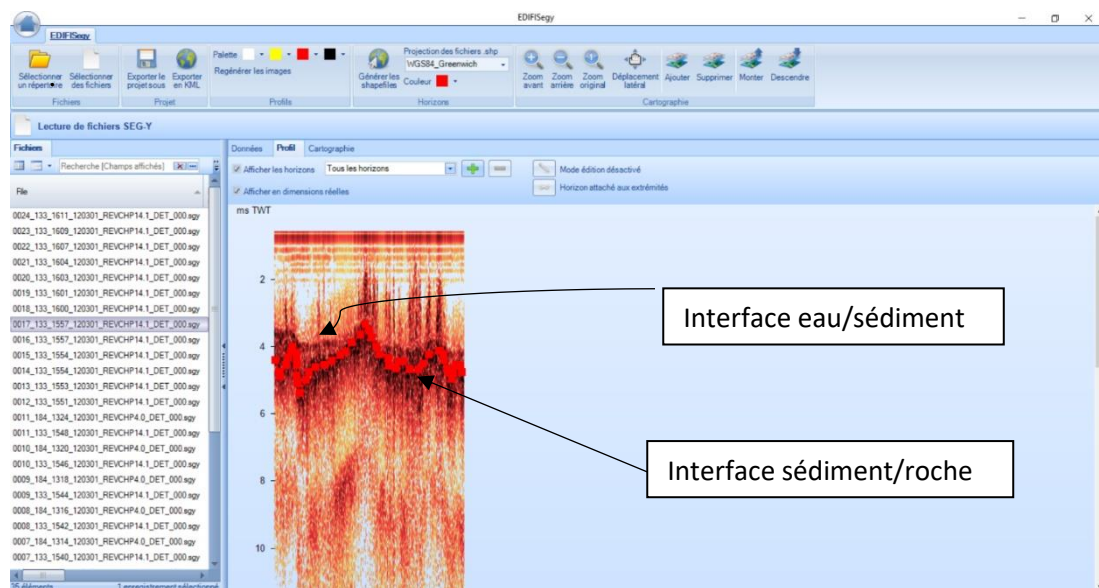


Figure 9 : Interface roche-sédiment pointée sur EDIFSegy sur un profil 14,1 kHz, il en va de même pour l'interface eau-sédiment

Une fois le Modèle Numérique de Terrain de la bathymétrie créé il ne reste plus qu'à fusionner ce Modèle Numérique de Terrain avec le Modèle Numérique de Terrain de la topographie obtenu précédemment. Une technique différente de la technique Merge utilisée précédemment consiste à convertir avec *3D Analyst* les deux Modèles Numériques de Terrain en isolignes, puis d'ajouter avec la fonction éponyme les isolignes de la bathymétrie à celle de la topographie en ayant préalablement supprimé manuellement les isolignes du Modèle Numérique de Terrain de la topographie qui font doublon avec celle de la bathymétrie.

Enfin, comme dernière mesure de terrain nous avons effectué, avec Emmanuel Chapron, un carottage qui consiste à récupérer une séquence sédimentaire avec un carottier gravitaire qui va s'enfoncer dans le sédiment et qui une fois remonté et conditionné pourra être étudié. Cette carotte permet de calibrer la cartographie acoustique du remplissage sédimentaire du lac. Sur cette carotte une cartographie spectrale obtenue avec l'aide d'un spectroscopie peut également

faciliter l'interprétation du carottage et une corrélation plus fine des différents faciès sédimentaires observées avec des données environnementales et historiques.

Pour le lac Pavin, j'ai utilisé la même technique décrite précédemment au détail près que cette fois la bathymétrie m'était fournie au format multicanal et non monocanal comme j'en avais l'habitude. J'ai donc dû convertir ce fichier en shape pour avoir les isolignes grâce à Global Mapper pour pouvoir l'importer sur ArcMap. Pour cela j'ai utilisé les outils de conversion *Raster to Shape* de Global Mapper, c'est l'unique fois où ce logiciel m'a servi au cours de ce stage.

### 3.3 – Géométrie des remplissages sédimentaires lacustres

Dans Loures-Barousse, la géométrie du remplissage a été définie à partir des données sismiques 4 et 14 kHz (figures 8 et 9). Le logiciel EDIFIS SEG Y a permis de carter l'horizon à la base du remplissage lacustre (Figure 9). J'ai pu estimer le volume du remplissage sédimentaire en utilisant la fonction *Soustraction* d'ArcMap entre le Modèle Numérique de Terrain de la bathymétrie et du substrat acoustique obtenu de la même façon que le précédent.

Pour replacer le site de Loures-Barousse dans son contexte géomorphologique et stratigraphique, j'ai modélisé la topobathymétrie de l'ancien lac de la Garonne obtenu en compilant un Modèle Numérique de Terrain 5 mètres de l'IGN avec les données de gravimétrie permettant ainsi de cartographier le toit du substrat rocheux et l'épaisseur des sédiments ayant comble le lac depuis le retrait du glacier de la Garonne (Perrouy et al. 2015). Pour obtenir la topographie du paléolac, on importe et géoréférence la carte de l'article de Perrouy et al, 2015 (annexe 4), afin de digitaliser les différentes altitudes estimées du rocher obtenues en relevant les anomalies gravimétriques. Pour faire cela, on crée un nouveau fichier de forme linéaire et on retrace les isolignes en renseignant la différence d'altitude. Puis, on interpole les isolignes avec *Topo vers raster* de la boîte *3D Analyst*, afin de limiter ce raster on le découpe pour qu'il ne corresponde qu'aux isolignes définies par Perrouy. Pour cela on crée un nouveau fichier de forme et l'on applique la fonction *Outils de gestion de données, Raster, Traitement de raster, Découpe*. Enfin, il ne reste plus qu'à soustraire le raster obtenu grâce à la gravimétrie de l'article de Perrouy au Modèle Numérique de Terrain IGN en faisant *3D Analyst, Raster – Math, Soustraction*. On obtient ainsi la figure 10.

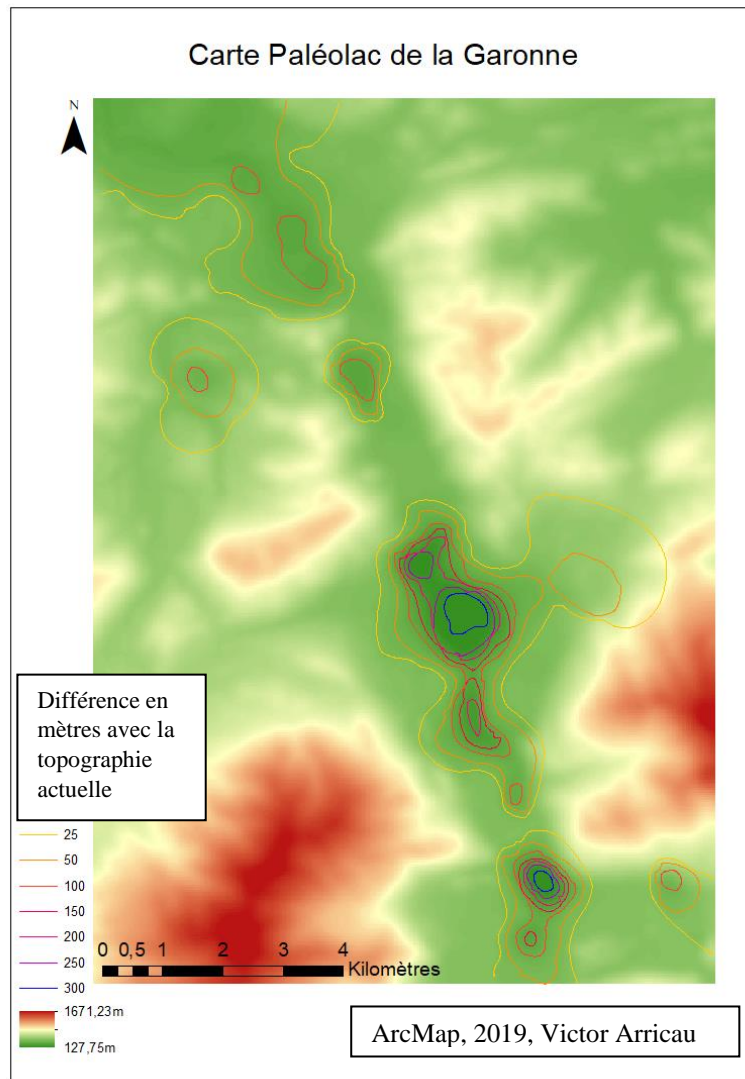


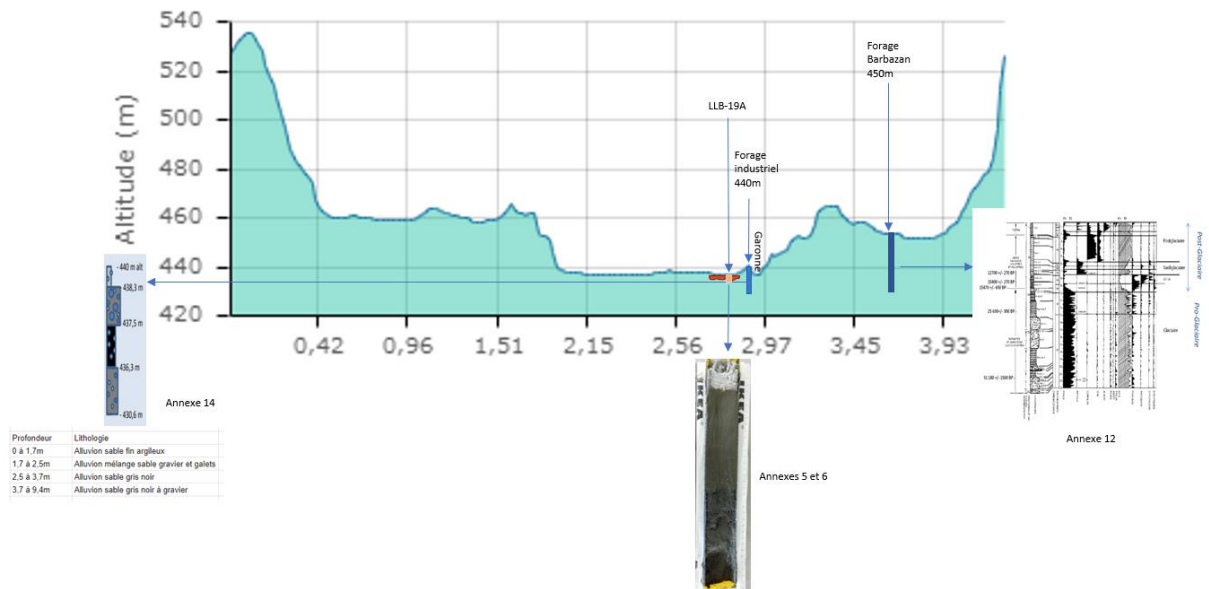
Figure 10 : Carte de la topographie actuelle et la géomorphologie du toit du rocher sous le remplissage du paléolac de la Garonne, obtenu grâce à l'article Perrouty et al, 2015

On remarque que cette carte ne correspond pas à l'ensemble du paléolac, car les travaux de Perrouty ne couvrent pas toute la zone du paléolac. Les sites de forages et carottages disponibles à proximité des lacs de Barbazan et de Loures-Barousse peuvent ainsi être replacés dans le contexte topobathymétrique du paléolac de la Garonne : figure 11.

La base de données utilisée pour comprendre le site de Loures-Barousse est constituée d'une part de l'extraction d'une portion du Modèle Numérique de Terrain de l'IGN, de l'analyse d'articles scientifiques notamment l'étude gravimétrique de Perrouty et al 2015 qui permet de montrer les anomalies gravimétriques de la vallée de la Garonne entre Saint-Béat et Loures-Barousse et d'autre part de l'étude de deux sites de forages dans le secteur : le premier est un forage scientifique à Barbazan de 23 mètres de profondeurs détaillé dans l'article d'Andrieu et

al. (1988) et le second est un forage industriel qui atteint une profondeur de 10,6 mètres sur la rive droite de la Garonne entre 450 mètres et 440 mètres d'altitude et dont la nature est détaillé sur le site infoterre du BRGM.

Figure 11 : Coupe topographique de la zone étudiée avec l'emplacement des carottes, localisé sur la figure 2



### 3.4 – Nature des remplissages sédimentaires

À partir des carottages gravitaires : LLB19-A prélevée aux coordonnées 504 800,946 ; 6 217 940,038 mètres (annexe 5) et PAV10-B, PAV09-C1, PAV09-C3 (Figures 5 et 8) il a été possible de calibrer les données sismiques et de préciser la nature des remplissages et leur chronologie. Nous avons tout d'abord noté toutes les particularités, présence de débris végétaux pouvant être datés au carbone 14, d'insectes ou de vers (indices de bioturbation du sédiment et du niveau tropique du système lacustre) ; ensuite il faut décrire l'aspect des différents faciès sédimentaires qui composent la carotte (texture, granulométrie et couleur notamment). Cette étape permet de garder une trace de la séquence sédimentaire et de mieux interpréter les résultats des analyses non destructives (susceptibilité magnétique, spectrocromimétrie) ou destructives (teneur en eau, teneur en carbone organique, analyse granulométrique) du signal sédimentaire (annexe 6).

Pour compléter l'approche visuelle, nous avons effectué en effet une analyse spectrométrique et de susceptibilité magnétique de la séquence sédimentaire prélevée dans le lac de Loures-Barousse. La susceptibilité magnétique volumique du sédiment a été mesurée avec un capteur Bartington MS2E, qui a été déplacé à la surface d'une demi-carotte tous les 0,5 cm, le long de la carotte, afin d'avoir une vision de la nature des sédiments. Un

spectrophotomètre Minolta a par la suite été similairement utilisé pour préciser l'évolution de la composition spectrale du sédiment le long de la carotte. Ce type de mesure non destructive permet de préciser la nature et parfois la taille des particules sédimentées et est très complémentaire de la mesure de la couleur des sédiments (spectrocolorimétrie) comme l'a démontré Debret et al (2010). Ces mesures complémentaires peuvent permettre de faire ressortir des faciès invisibles à l'œil nu (Annexe 7). Une fois les mesures enregistrées on obtient des fichiers .txt utilisables sur Excel. Pour les données relatives à la spectrométrie il faut organiser les données de telle sorte à obtenir un fichier de trois colonnes une nommée X qui correspond à la profondeur du point sur la carotte, une seconde, Y qui correspond à la longueur d'onde du point et enfin la dernière Z qui correspond à la valeur (Annexe 8). C'est seulement avec cette présentation sous forme d'un fichier en .csv que l'on peut importer les points sur ArcMap avec l'option *Importer des données X/Y* puis pour leur donner l'apparence d'une carte spectrale et non d'un amas de points il faut utiliser la fonction *Kernel interpolation with barriers* de *Geostatistical Analyst*. Cette carte permet ainsi de visualiser la prépondérance de telle ou telle longueur d'onde à une profondeur donnée comme détaillé dans Debret et al. (2011).

Pour les carottes du lac Pavin, nous développerons uniquement l'étude de la carotte Pav10-B puisque d'une part elle comporte des traces qui s'apparentent à un dépôt d'éruption limnique, entre 11 cm et 23 cm, et que d'autre part un modèle d'âge a été fait (Chassiot, 2016). Il est à noter que les carottes Pav08-B, Pav09-C1, Pav09-C2, Pav09-C3, Pav09-C4 et Pav09-P1 ont aussi été étudiées (annexe 9). Nous avons tout d'abord réalisé un croquis de la carotte Pav10-B ainsi que soumis cette dernière à une spectrométrie et à de la susceptibilité magnétique. L'analyse spécifique des carottes Pav10-B, Pav09-C1 et Pav09-C3 a été l'XRF fait par le CEREGE, Itrax de Marseille avec un pas de 2 mm. Nous avons ainsi conditionné les carottes dans un U Channel, tube en forme de U dont le plastique n'émet pas d'onde. Pour cela il faut planter le U Channel dans la carotte, légèrement éloigné du bord pour ne pas polluer l'échantillon, puis de le sortir en pivotant le U Channel sur le côté ; il reste alors à éliminer le dépôt superflu qui peut être une source de pollution. La radiographie fluorescence (XRF) de carottes sédimentaires permet de fournir des enregistrements à haute résolution des variations relatives de la composition élémentaire des sédiments (Löwermark, 2010). Une fois l'XRF passé on obtient un tableau Excel avec, entre autres, la teneur de divers éléments chimiques en un point de la carotte. (Annexe 10).

Parce que les sédiments du lac Pavin sont riches en matières organiques, les données XRF ne sont pas très précises (Simoneau et al. 2014, LBH QSR, Chassiot et al 2018). Pour

préciser l'identification d'éventuels dépôts d'éruption limniques (LED), j'ai effectué des analyses au laboratoire GEODE de pertes au feu. L'objectif de la perte au feu est d'éliminer la matière organique qui peut troubler les résultats de l'XRF du CEREGE (Itrax) afin de passer ces échantillons à l'XRF du laboratoire GEODE (annexe 10.b) ; nous souhaitons aussi avoir une vision la moins étreignée possible de l'impact des diatomées sur les résultats de l'XRF. Nous avons donc choisi neuf échantillons n'étant pas sur des frontières de faciès sédimentaires, un tiers des échantillons choisis se trouvent dans le faciès typé dépôt d'éruption limnique, un autre avant et le dernier après ce faciès.

Pour réaliser une perte au feu il faut tout d'abord sécher l'échantillon en suivant le protocole ci-dessous, d'après protocole de Anaëlle Simonneau, laboratoire GEODE 2013 :

Dans un premier temps il faut peser le creuset vide, noté :  $P_{\text{creuset}}$ , ajouter l'échantillon dans ce dernier et peser de nouveau le creuset, noté :  $P_{\text{creuset+éch}}$  puis répéter l'opération, ici pour les neuf échantillons. Une fois les creusets remplis et pesés il faut les enfourner dans l'étuve : Réglage 105 °C, Durée 24h. Après l'étuvage terminé il faut laisser les creusets puis les peser, noté :  $P_{105^{\circ}\text{C}}$ . Lorsque le nouveau poids des creusets après étuvage est acquis, on obtient le tableau de données (annexe 11. a). La démarche suivante vise à réduire les échantillons en fine poudre pour débiter le protocole de la perte au feu à proprement dit. Il faut broyer les échantillons une part un et filmer les échantillons non manipulés afin qu'ils ne s'humidifient pas de nouveau et peser de nouveau les creusets vides puis avec le sédiment broyé. Une fois la pesée effectuée on ajoute sur chaque creuset un couvercle en porcelaine puis on place les creusets dans le four à moufle Réglage 550 °C ; durée 4h. Une fois le programme terminé et les creusets refroidis on pèse les creusets sans les couvercles, noté :  $P_{550^{\circ}\text{C}}$  (annexe 11. b).

Les résultats ainsi obtenus sont utiles pour le calcul de la teneur en eau du sédiment, la teneur en carbone organique et enfin la teneur en cendre :

- **Teneur en eau**

$$\text{teneur en eau (\%)} = 100 * \frac{P_{\text{creuset+éch}} - P_{105^{\circ}\text{C}}}{P_{105^{\circ}\text{C}}}$$

- **Teneur en carbone organique (CO)**

$$LOI\ 550 = \frac{100 * (P_{105^{\circ}\text{C}} - P_{550^{\circ}\text{C}})}{P_{105^{\circ}\text{C}} - P_{\text{creuset}}}$$

$$CO\ (\%) = \frac{LOI\ 550}{2}$$

- **Teneur en cendre**

$$\text{teneur en cendre (\%)} = 100 - CO$$



Une fois l'ensemble des relevés pour les calculs il sera possible d'identifier les différentes séquences sédimentaires de façon précise afin de voir si le faciès d'éruption limnique ressort avec l'un des proxys.

Enfin j'ai fait des mesures ponctuelles d'XRF avec le pistolet disponible au laboratoire GEODE afin de remesurer les teneurs en éléments de ces échantillons ponctuels après avoir brûlé toutes les matières organiques.

### 3.5 – Délitiation du bassin versant hydrographique du lac Pavin

Puisque le Pavin a des sources subaquatiques (Figure 4), son bassin versant topographique ne correspond pas exactement à son bassin versant hydrographique (Chassiot et al 2016, Chapron et al. 2016). Pour bien comprendre la sensibilité de ce lac à l'usage des sols au sein de son bassin versant hydrographique, j'ai compilé les données Modèle Numérique de Terrain de l'IGN d'une résolution d'un mètre avec les données bathymétriques.

La topographie atypique du lieu permet de définir le bassin versant hydrologique direct (Chassiot, 2018) qui correspond aux rives surélevées du lac (figure 12).

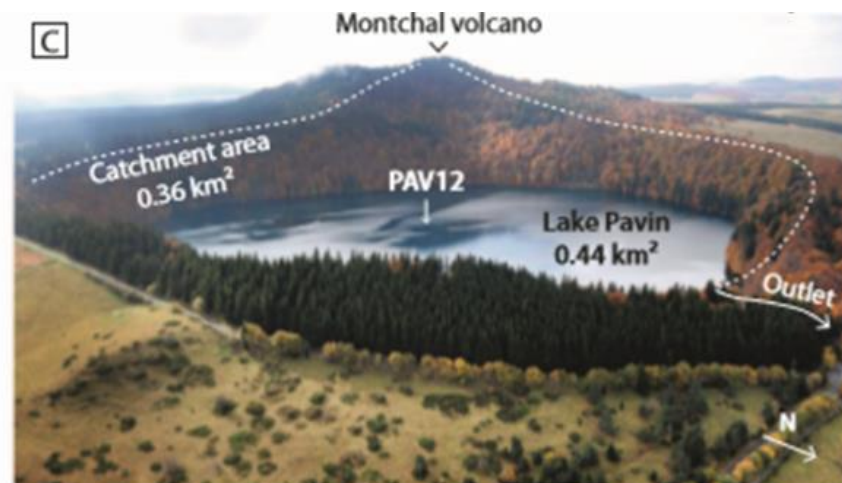


Figure 12 : Bassin versant hydrologique du lac Pavin, Chassiot, 2018

Afin de valider cette analyse j'ai modélisé le bassin versant théorique du lac dans ArcMap, grâce à l'aide de Johann Blanpied, doctorant au laboratoire GEODE. Pour cela j'ai travaillé à partir de la carte topobathymétrique fine et géolocalisée obtenue en créant un Modèle Numérique de Terrain à partir de six dalles Modèle Numérique de Terrain 1 mètre de l'IGN et de la bathymétrie multifaisceaux de Chapron et al. (2010). À partir de ce Modèle Numérique de Terrain comprenant le lac et son environnement, j'ai utilisé la fonction *Remplissage* de *Spatial Analyst* qui permet de remplir les pixels vides du raster en pondérant les valeurs des pixels limitrophes afin de n'avoir aucun pixel vide. Un pixel vide correspond à une valeur



erronée qui induirait des erreurs lors de la modélisation des cours d'eau théoriques. Une fois le raster rempli on utilise la fonction *Direction de Flux*, qui permet de modéliser les cours d'eau théoriques, de mettre en exergue les cuvettes et vallées de la zone ; ainsi que la fonction *Accumulation* qui convertit la couche obtenue par Direction des Flux afin qu'elle puisse être rentrée lors de l'utilisation de la fonction *Bassin Versant*, toujours dans Spatial Analyst. Enfin, la dernière étape avant de modéliser le bassin versant théorique est de créer un nouveau fichier de forme, shape, en ne plaçant qu'un seul point correspondant à l'exutoire de la zone dont on veut délimiter le bassin versant, ici l'exutoire du lac. Puis il s'agit de lancer la fonction *Bassin Versant*, toujours dans *Spatial Analyst* et de rentrer le Modèle Numérique de Terrain obtenu avec la fonction Accumulation et la couche fichier de forme de l'exutoire afin d'obtenir un polygone correspondant au bassin versant théorique.

Cependant dans un tel contexte hydrogéologique le calcul d'un bassin versant théorique par le logiciel ArcMap n'est pas adapté pour définir les limites du bassin versant puisqu'il ne permet seulement que de délimiter les secteurs drainés par le cône de scorie du Montchal et le cratère du Pavin. J'ai croisé les données topographiques, avec les coupes géologiques disponibles (Figures 20 et 21), ainsi qu'une lecture géomorphologique des environs du cratère.

## 4 – Résultats et Interprétations

### 4.1 – Lac de Loures-Barousse

Il s'agit ici de définir d'une part la morphologie du paléolac de la Garonne et d'autre part l'importance et l'impact de la crue de 2013 sur le lac de Loures-Barousse. On observe dans la séquence glaciolacustre de Barbazan un changement de composition en 15 470 +/- 430 BP où l'on passe d'une sédimentation glaciolacustre à une sédimentation comportant de la vase et du calcaire lacustre (annexe 12, Andrieu, Jalut et al, 1988). Le calcaire est une roche originaire des reliefs bordant le lac de Barbazan, cela voudrait dire qu'aux environs de 15 470 +/- 430 BP le lac de Barbazan qui faisait partie du paléolac de la Garonne est devenu une entité propre déconnectée de ce grand lac. Cette information nous permet donc d'affirmer que le paléolac de la Garonne a possédé à minima deux niveaux. Un datant d'avant 15 470 +/- 430 BP que l'on nommera paléolac 1 et qui englobe Barbazan, et un deuxième datant d'après 15 470 +/- 430 BP que l'on nommera paléolac 2 et qui correspond au lac sans Barbazan. Il s'agit maintenant de déterminer les deux niveaux du lac. Avec la figure 13 publiée dans l'article Andrieu et al., (1988) on observe un changement de substrat au sud de Barbazan avec le passage d'une plaine alluviale actuelle (6) à des moraines et des formations fluvio-glaciaires récentes (8).

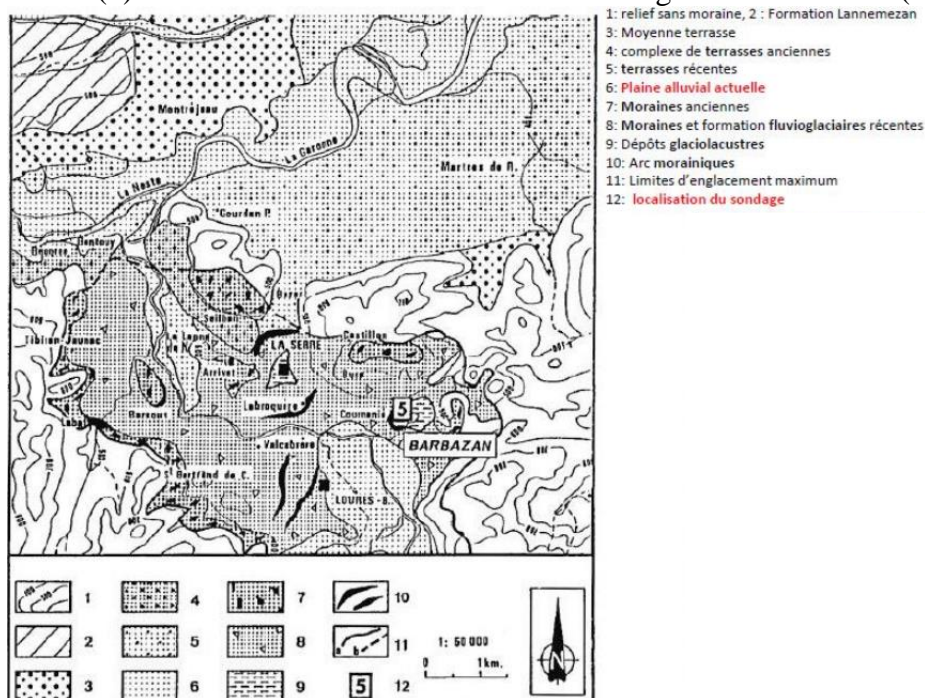


Figure 13 : Carte des formations quaternaires du secteur de Loures-Barousse et de Barbazan, modifiée d'après Andrieu et al., (1988)

De plus, on observe sur la carte IGN (annexe 13) un goulot d'étranglement composé d'une ancienne moraine culminant entre 466 et 488 mètres, ce qui est suffisant pour noyer l'actuel lac de Barbazan. Cela laisse donc penser que le paléolac 1 s'étendait jusqu'ici et que la moraine fermait ce dernier. Avec ces informations il est donc possible de reconstituer la paléogéographie de ce lac avant et après son changement de niveau. On obtient donc la figure 14 en extrayant les isolignes correspondantes et en tenant compte des anciennes moraines. On obtient donc une altitude de 460 m et de 505 m

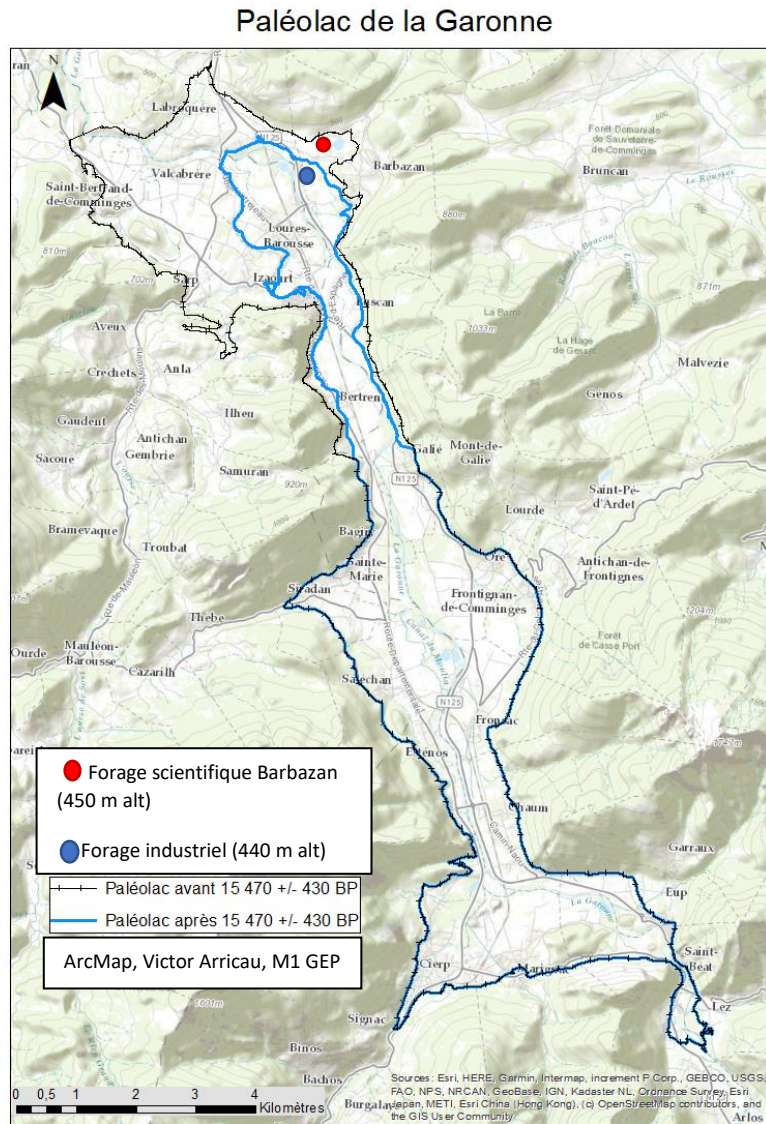


Figure 14 : Carte de la vallée de la Garonne avec les différents niveaux du paléolac et les deux sites de forages

Lors de l'analyse des profils sismiques de Loures-Barousse, on observe deux faciès acoustiques (figure 9), le premier montre l'interface eau/sédiment et le second nous montre le substrat « dur », caractérisé par un fort contraste d'impédance acoustique. Cela traduit

probablement le toit des granulats fluviaux qui n'ont pas été exploités, c'est-à-dire la topographie dans laquelle la carrière a été laissée avant la formation du lac de gravière.

L'observation de ces deux faciès une fois pointés nous permet de calculer l'épaisseur sédimentaire, le remplissage sédimentaire du lac entre la fin d'exploitation de la gravière et 2019. Pour cela il suffit d'interpoler les faciès pointés dans EDIFISeg et l'on obtient les Modèles Numériques de Terrain suivants : figure 15 et annexe 14.

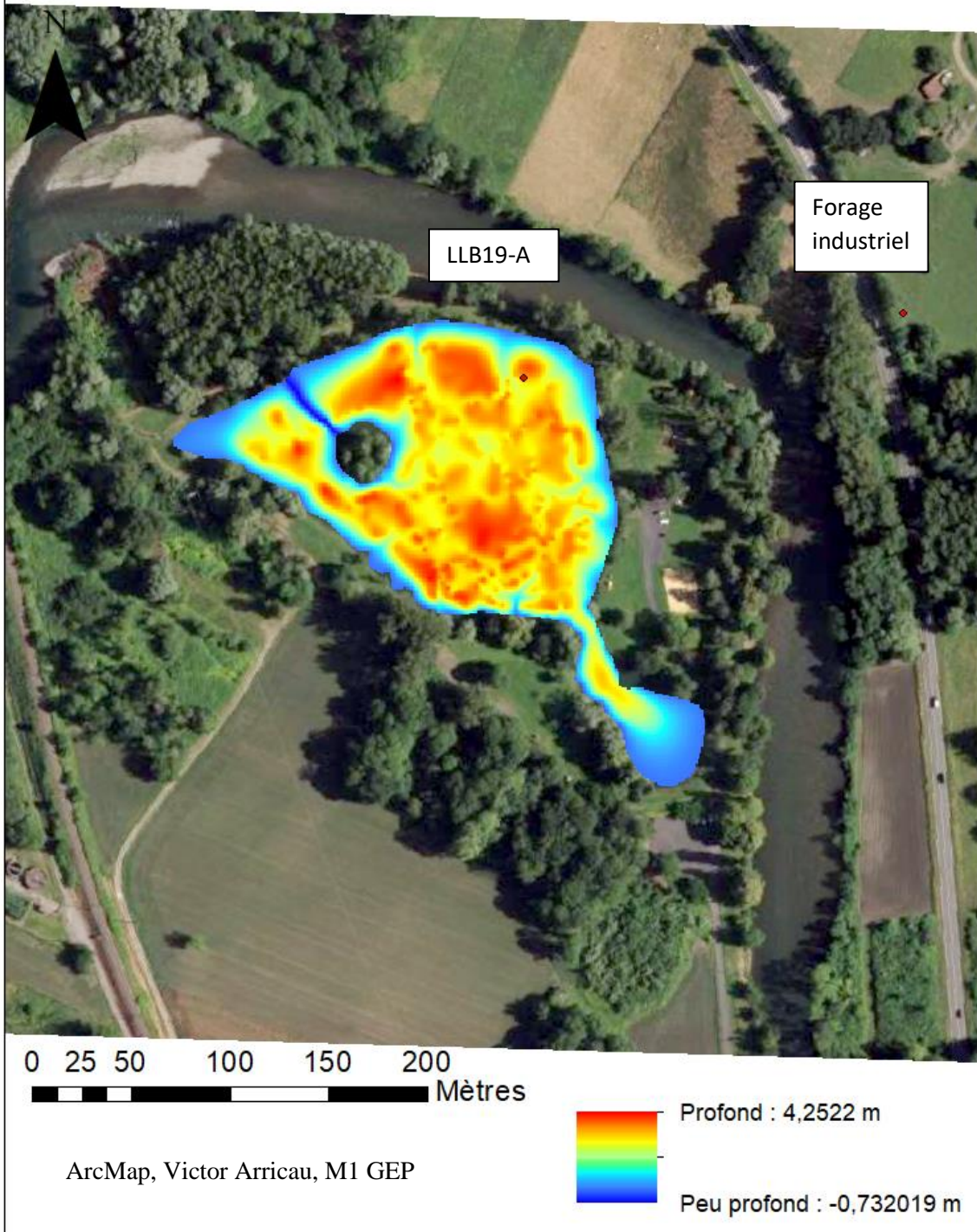
On remarque deux problèmes sur ces cartes, d'une part le canyon profond au nord de l'île qui correspond à un manque de données, pour la carte du substrat rocheux et ensuite la bathymétrie qui se construit sur des profils sismiques ce qui accentue l'effet de pente qui converge vers l'emplacement des profils.

Ces cartes montrent une partie du processus d'extraction en mettant en exergue les coups de pelleuse laissant des griffures dans le lac et qui sont visibles de part et d'autre de la carotte LLB19-A. Ces griffures sont par ailleurs bien visibles sur les coupes sismiques (Figure 15) on observe aussi un cône plus profond au sud du lac qui correspond certainement à la zone qui était la plus riche en granulats exploitables, ou tout du moins, la zone la plus rentable à exploiter.

Après avoir obtenu les deux modèles numériques de terrain précédents, on soustrait dans ArcMap le modèle numérique de terrain du substrat rocheux du lac à celui de la bathymétrie et l'on obtient une carte d'épaisseur sédimentaire (Figure 16). Sur cette carte on observe des zones noires qui sont des zones où le résultat de la soustraction est négatif, c'est-à-dire que la roche y est affleurante. Ce phénomène est accentué par un maillage lâche qui laisse place à des incertitudes. Cependant, on observe aussi des épaisseurs sédimentaires importantes qui montrent une abondance de sédiment par endroit (zones bleu roi) et qui se situent en majorité aux abords du lac. Cette couche de sédiment peut être due au remblai fait par l'Homme lors du nettoyage du parc après la crue de 2013, lorsque les limons ont été poussés dans le lac ; expliquant que seules des zones proches du bord et ponctuelles aient une couche de sédimentation importante : ce sont les endroits où le sédiment a été introduit dans le lac en le poussant.



# Carte du substrat rocheux



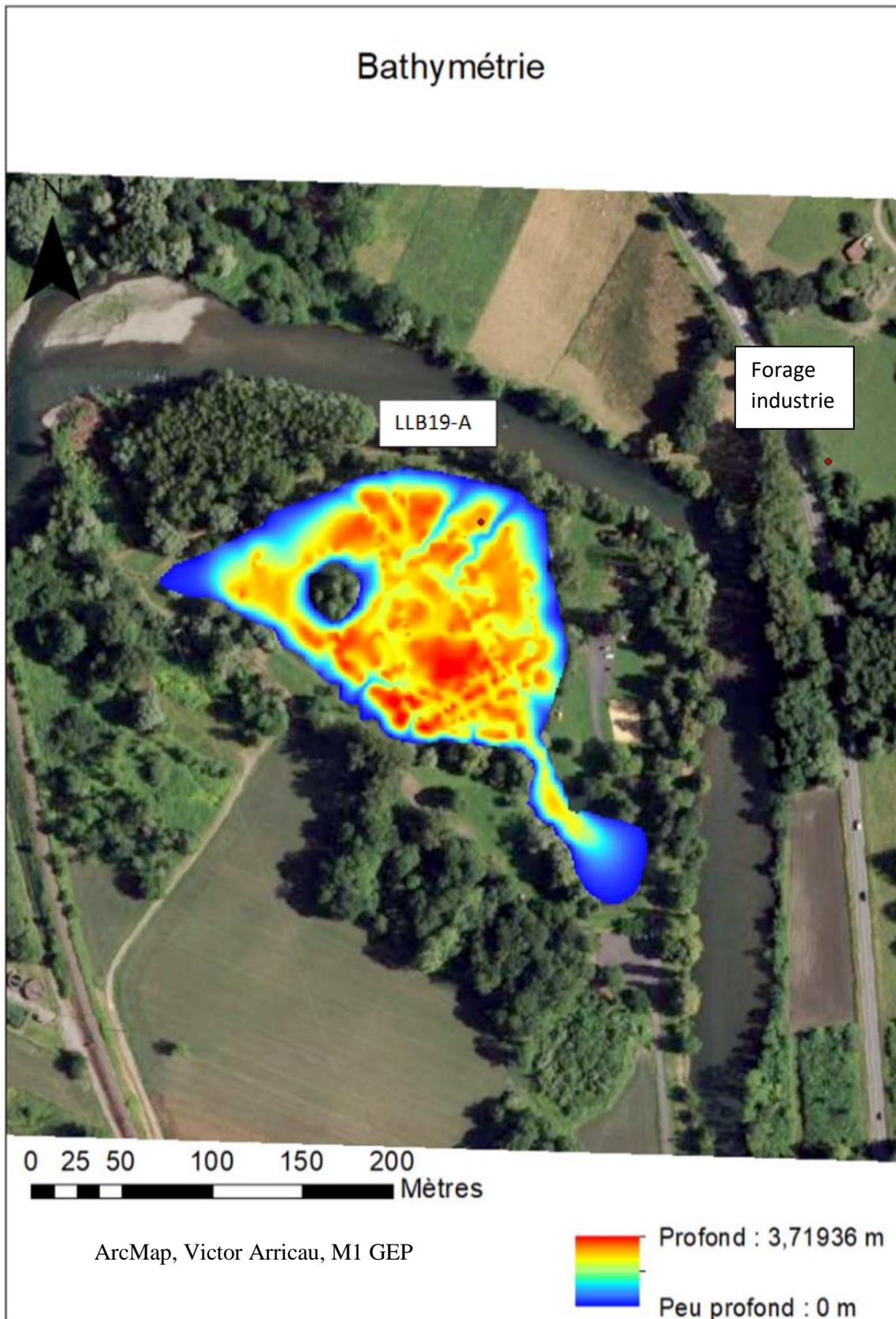


Figure 15 : Cartes du substrat rocheux et de la bathymétrie du lac de Loures-Barousse obtenues à partir des données sismiques collectées en 2017 et 2019



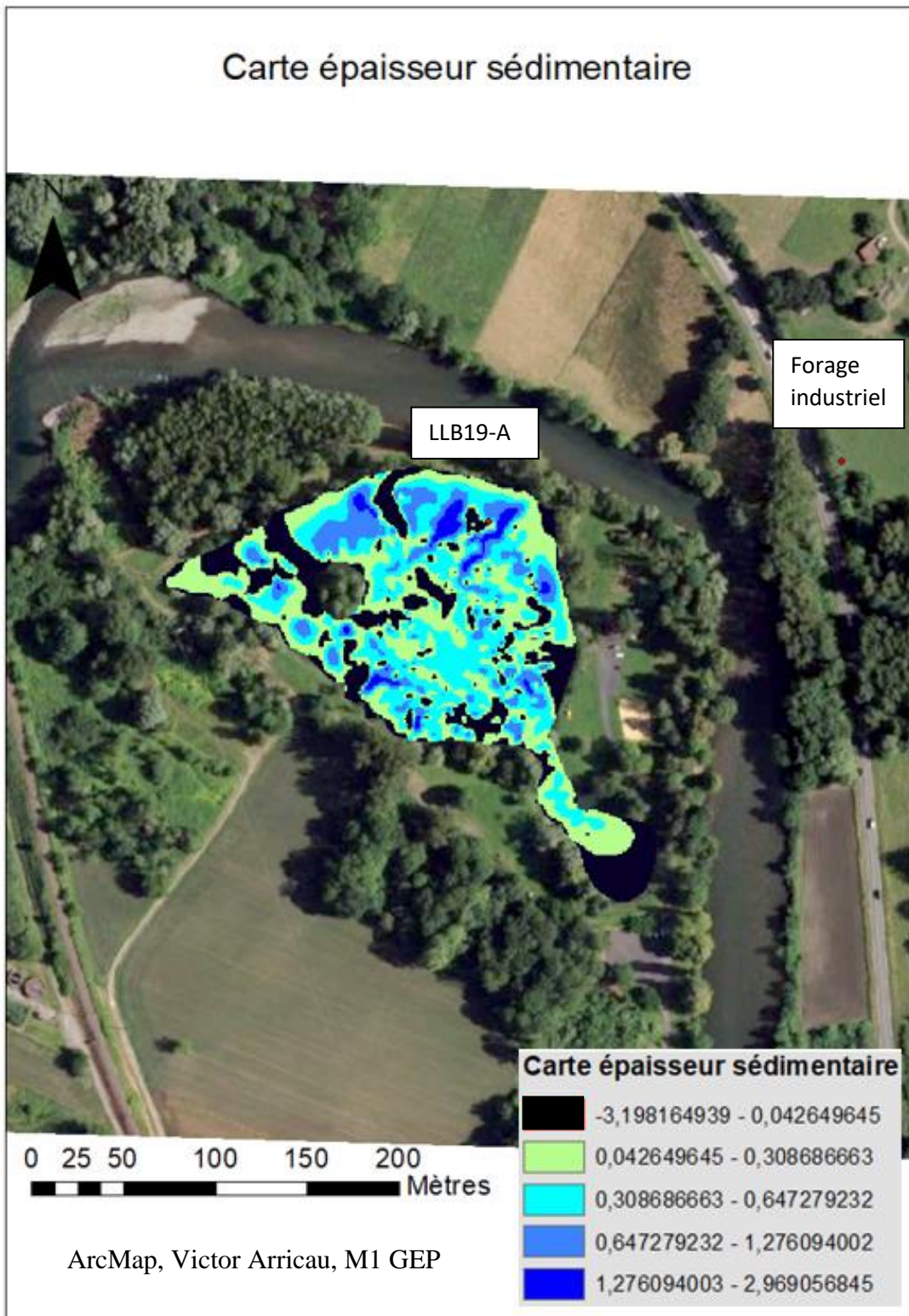


Figure 16 : Carte d'épaisseur du remplissage sédimentaire lacustre dans le bassin de Loures-Barousse

De plus, le fait que la hauteur de la carotte corresponde à la valeur de la carte sédimentaire au point de carottage nous conforte dans l'idée que ce modèle est juste, en ce point. Cette technique permet donc de calculer la charge fine déposée par une crue. En

extrapolant la véracité de ce modèle, on obtient une estimation du volume de sédimentation depuis la fin d'exploitation de la gravière qui correspond à 14095 mètres cubes. Nonobstant, pour valider ce cubage il faut analyser la carotte LLB19-A. La première analyse est l'analyse visuelle qui se base sur l'annexe 5, on observe que l'aspect général correspond aux données obtenues lors du forage industriel : faciès entre 1,7 mètre et 2,5 mètres de profondeur qui est composé d'alluvions, mélange de sable, gravier et galets. En effet, car on traduit en altitude on obtient un faciès compris entre 438,3 mètres et 437,5 mètres pour le forage industriel et une profondeur équivalente pour la carotte LLB19-A (annexe 14 et figure 11).

On voit sur cette carotte, du bas vers le haut, une séquence de sable gris granoclassé allant des éléments les plus grossiers aux plus fins avec en son centre un galet fluviatile. Ce faciès qui s'étend de 34 cm à 25,5 cm correspond à une séquence fluviatile. De 25,5 cm à 25 cm, on observe un faciès de fins sédiments gris qui dénote avec le faciès précédent et celui qui le surplombe, entre 25 cm et 19 cm. Ce faciès allant de 25 cm à 19 cm est composé comme le premier de sable noir sauf que son granoclassement est différent puisque la taille des granulats va de fin à plus grossier, puis de plus grossier à plus fin, organisation qui montre une sédimentation due à un pic de crue (Chapron et al., 2008) : la suite de ce faciès est caractérisée par la décroissance de la taille des grains déposés qui est symptomatique d'une décrue. L'avant-dernier faciès qui s'étend de 19 cm à 7 cm est composé de sédiments fins gris avec des zones gris foncé qui sont des dépôts fins de la décrue : les silts qui ont été déposés dans le lac et autour du lac. Les responsables du lac ont ensuite raclé et envoyé ces limons dans le lacs. Sur ce faciès on voit donc les deux faciès à cause de l'intense bioturbation : les dépôts initiaux ont été mélangés. On trouve aussi dans ce faciès des brindilles (à 7, 10 et 18 cm) ainsi que deux vers rouges, un vivant à 10 cm et le second mort à 13 cm. La présence de ces vers explique l'homogénéité de ce faciès qui est bioturbé. Enfin, le dernier faciès de 7 cm à 4,5 cm est lui aussi composé de sédiments gris, mais qui tendent vers le jaune.

À l'issue de cette analyse on obtient le croquis en annexe 6, et l'on peut définir la séquence fluviatile (de 34 cm à 25,5 cm), la séquence de crue (de 25 cm à 19 cm), mais l'on définit mal le faciès de remblais composé des sédiments remis dans le lac par l'Homme en raison de l'importante bioturbation.

Pour définir cela, il faut regarder l'ensemble des courbes obtenues, Susceptibilité magnétique et Spectrométrie (Figure 17)



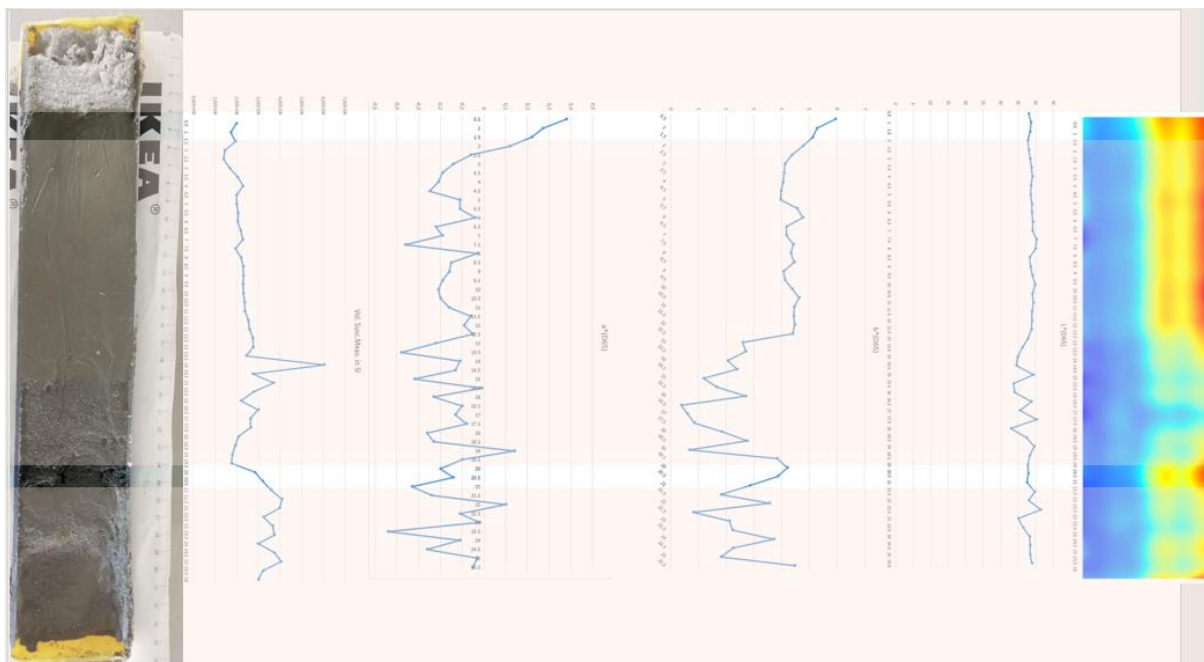


Figure 17 : Susceptibilité magnétique et Spectrométrie de la carotte LLB19-A

On observe dans les zones claires une signature spectrale similaire qui correspond à des zones de sédiments fins. Comme ces deux faciès sont similaires et qu'ils ne correspondent pas à la période de crue et dénotent aussi de la séquence s'étalant entre 19 cm et 7 cm qui correspond par élimination à la séquence sédimentaire de remblai, alors ils s'avèrent être les zones de sédimentation normale de la crue avec quelques silts déposés ultérieurement par l'Homme. Donc la carotte se compose de la séquence fluviale de 34 cm à 25,5 cm, d'une séquence de sédimentation lacustre de 25,5 cm à 25 cm qui correspond à la sédimentation entre la fin d'exploitation et la crue de 2013, de 25 cm à 19 cm il y a le faciès de crue et de décrue puis on observe la partie composée du remblai de 19 cm à 7 cm et enfin de 7 cm à 4,5 cm il y a le second faciès de sédimentation normale du lac après 2013. On constate donc que sur cette carotte la majorité de la séquence sédimentaire est composée de sédiments de la crue de 2013 il est ainsi possible de valider le volume énoncé précédemment de 14095 mètres cubes, c'est-à-dire le volume de limon déposé par la crue de 2013.

On peut ajouter à ce volume les 160 mètres cubes contenus dans un monticule au sud du lac qui correspond au compactage des sédiments de la crue de 2013. On obtient donc un volume de 14255 mètres cubes, si l'on considère que le parc du lac de Loures-Barousse fait environ 24000 m<sup>2</sup> et que d'après les pêcheurs, témoignage 2019, il y avait 60 cm de sédiment lacustre cela donne un volume similaire à celui cité précédemment. Ceci montre qu'une grande

partie des dépôts de crues a été déposé dans le lac et non remise dans le lit de la Garonne contrairement à ce que la législation préconise.

Il ne reste qu'à délimiter la zone d'extension de crue en 2013, d'après des témoignages et des vidéos YouTube on observe que le camping était immergé au niveau correspondant à l'isoligne 440 mètres d'altitude, figure 18. En extrayant cette isoligne sur ArcMap on obtient le polygone suivant et il se trouve que la limite nord de cette zone d'extension correspond à la moraine qui limitait le paléolac 1.

### Carte de la zone d'expansion de la crue de 2013.

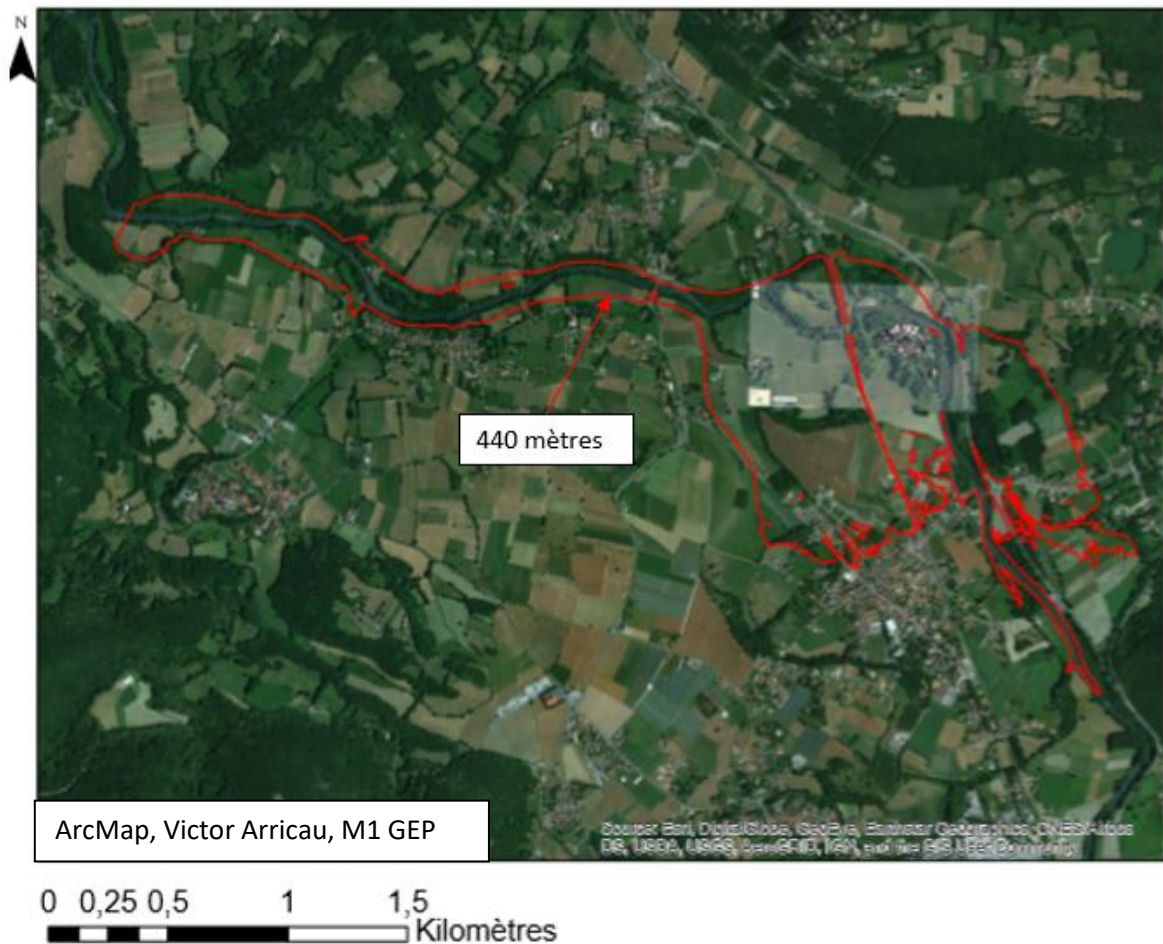


Figure 18 : Zone d'expansion de la crue en 2013

L'ensemble de ces informations permet de compléter les travaux de Struma et al. (2017), en ajoutant la zone de crue dans le secteur de Loures-Barousse ainsi que le paléolac de la Garonne.

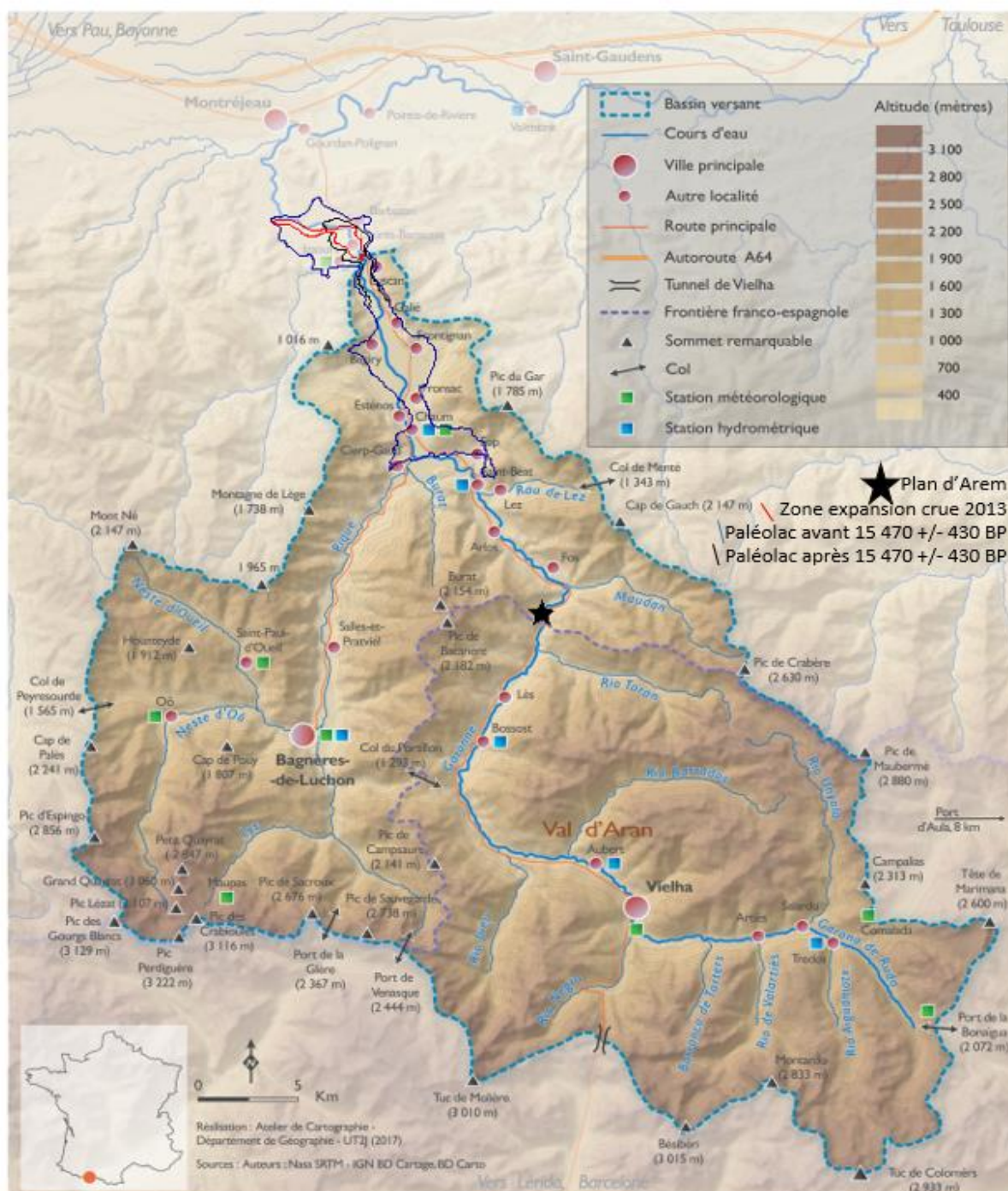


Figure 19 : Modification carte de Sturma et al, 2017 élargissant la zone du bassin versant de la Garonne touchée par la crue de 2013

Cette zone d'expansion de crue montre l'influence de l'héritage glaciaire et du paléolac sur l'exposition des communes au risque d'inondation.



## 4.2 – Pavin

La méthode de délimitation théorique du bassin versant hydrologique énoncée précédemment ne permet de définir ce dernier qu'en fonction du relief. Or on remarque dans les travaux de Michel Meybeck que le système lacustre Pavin est lié au Creux de Soucy situé à deux kilomètres au sud du lac. Cette liaison est visible par le niveau de l'eau qui est égale aux deux sites, figure 20.

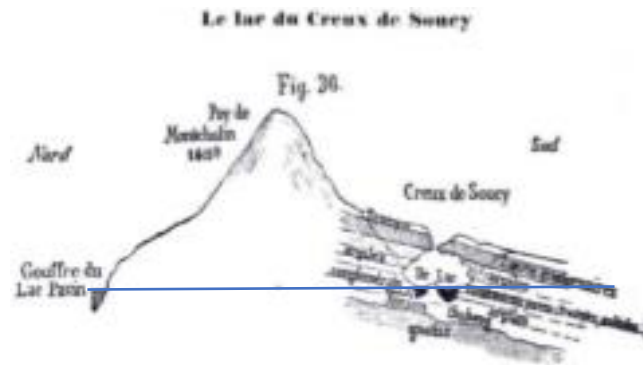


Figure 20 : Coupe du creux de Soucy du Nord au Sud, montrant la similitude de niveaux entre le creux de Soucy et le lac Pavin, Meybeck 2016

De plus, divers témoignages indiquent différentes arrivées d'eau qui alimentent le lac : « En faisant le tour du lac sur le bord de l'eau, on voit facilement les sources qui l'alimentent, et qui sortent d'une coulée de lave qui paraît suspendue à plus de quarante pieds au-dessus de son niveau. » (Lecoq 1835, p.80-82, cité par Boivin and Jouhannel, 2016). Ces différentes sources, immergées ou non, attestent d'un système aqueux souterrain complexe aux ramifications multiples (Chapron et al., 2010 ; Chassiot et al., 2018). La complexité de ce système s'explique grâce à la carte géologique qui montre l'empilement de plusieurs coulées basaltiques et trachytiques provenant du Montchal et du Sancy (Glangeaut cité par Leyrit et al., 2016) qui créent un réseau favorable aux mouvements d'eau dans le sous-sol.

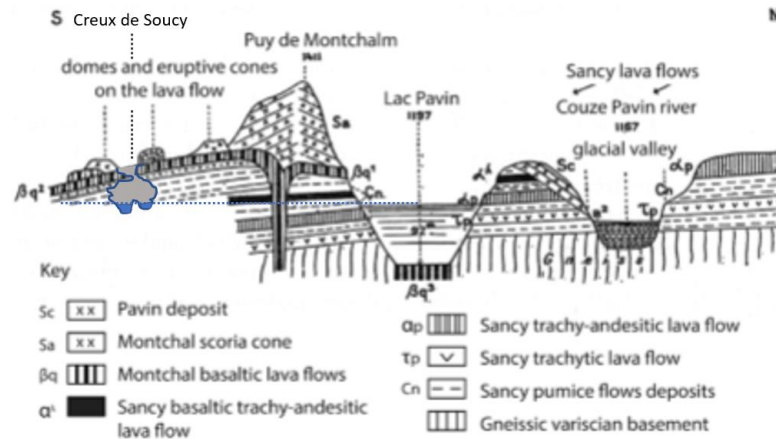


Figure 21 : Coupe géologique du complexe Pavin-Montchal avec le creux de Soucy, modifié d'après les travaux de Meybeck 2016 et Glangeaut 1916

Au regard de ces informations, nous pouvons déjà affirmer que ce dernier s'étend à minima au-delà du Creux de Soucy. Pour poursuivre la compréhension de ce bassin versant, il est nécessaire d'étudier la carte des pentes que l'on obtient dans ArcMap grâce à la fonction *Pente* de l'extension *3D Analyst* à partir de la carte topobathymétrique. À l'est du lac, au-delà du cratère, on observe une étendue plate avec une faible pente qui devient peu à peu plus importante, comme le montre le toponyme *Montagne des Fraux* (différence de dénivelé). À cela s'ajoute le maar d'Estivadoux qui est une zone humide et est donc composé de poches de rétention d'eau, et c'est donc pour cette raison que nous limitons le bassin versant ici. Pour la limite ouest nous partons du postulat qu'elle s'arrête au Montchal en raison des pentes de ce dernier. Enfin, pour les limites restantes on note que par son dénivelé, la Couze Pavin draine les eaux au nord alors que celles du sud sont captées par le lac de Bourbouze. Enfin, on note qu'à l'ouest le site se trouve à la limite du partage des eaux entre le bassin Loire-Bretagne et celui d'Adour-Garonne, celles du sud sont captées par le lac de Bourbouze.

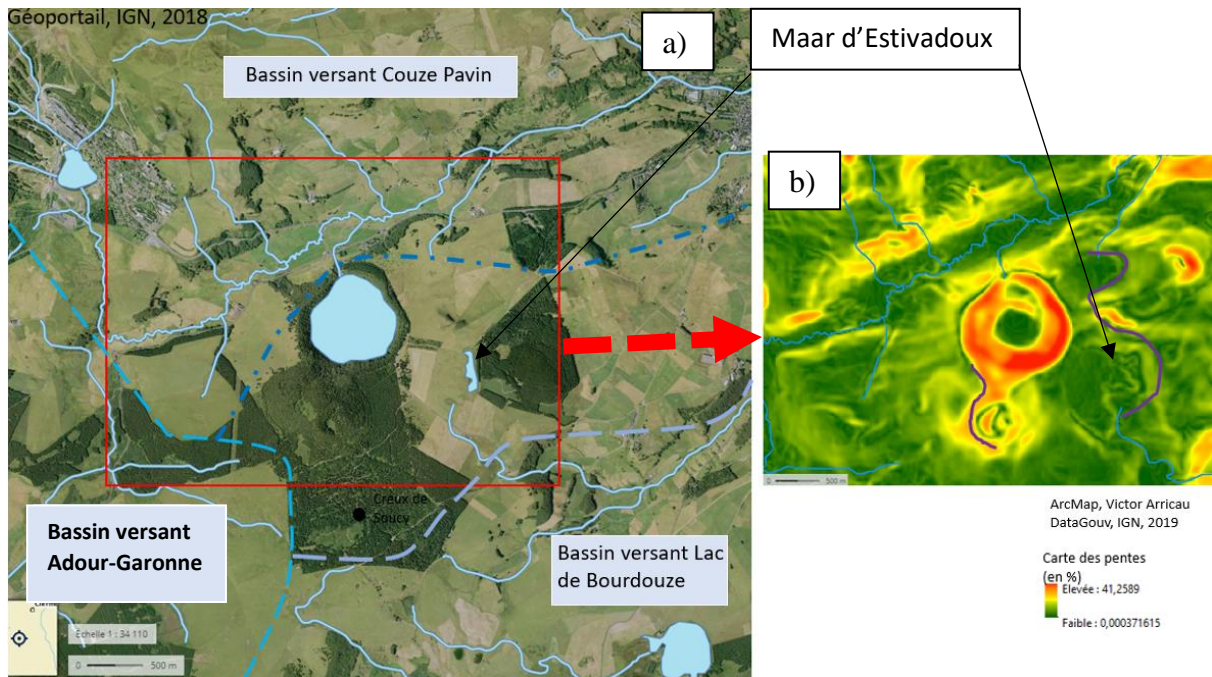


Figure 22 : a) Limites des différents bassins versants entourant le lac Pavin, b) Cartes des pentes du lac Pavin

Lorsque nous totalisons l'ensemble de ses informations, on obtient le bassin versant hydrographique du lac Pavin le plus probable (Figure 23)

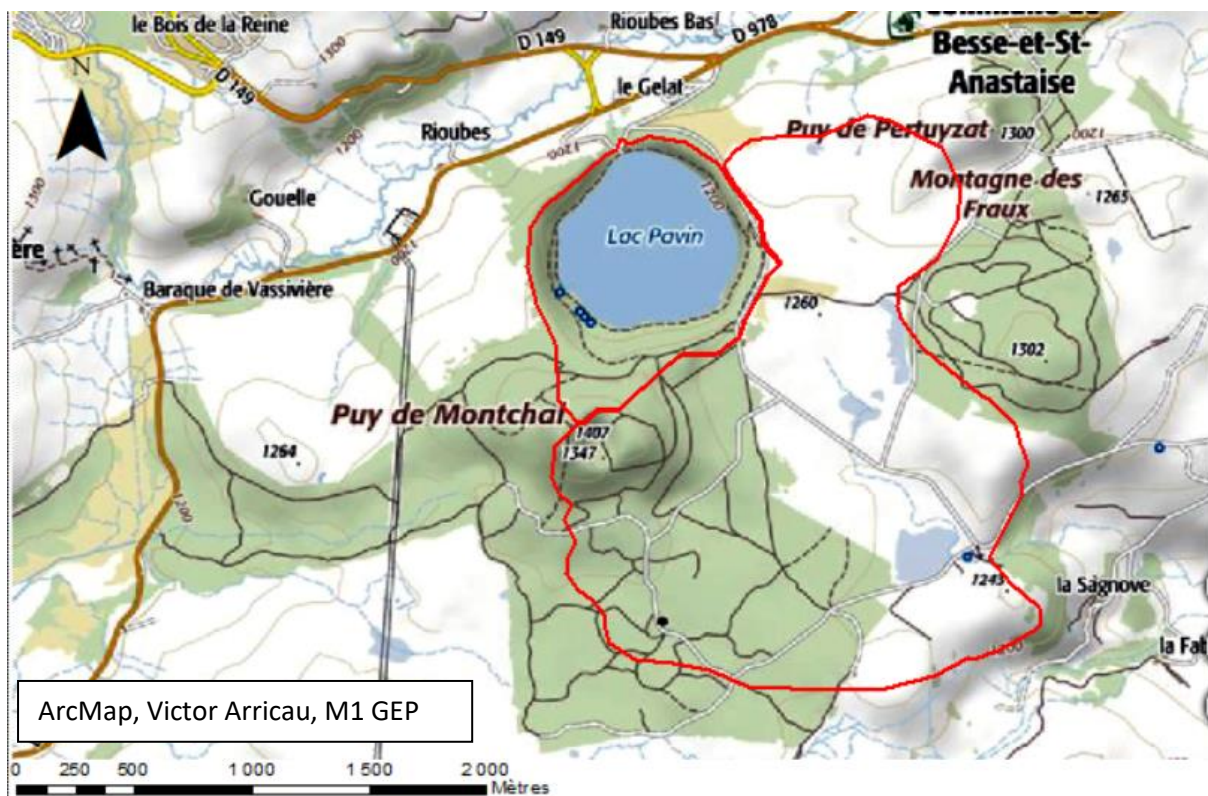


Figure 23 : Carte du Bassin versant topographique et hydrologique du lac Pavin



Le bassin versant qui vient d'être défini concorde avec celui proposé par le Contrat territorial de la Couze Pavin de 2017 établi par le parc naturel régional des volcans d'Auvergne qui a pour but de protéger quatre lacs, dont le lac Pavin (annexe 15). Ce contrat territorial a pour but de limiter la contamination des eaux de ces lacs à l'aide d'intrants. Ces derniers permettent le développement de divers organismes tels que les cyanobactéries ou encore les diatomées. Or des études antérieures (Chapron et al., 2010) ont prouvé que les séquences sédimentaires étaient en partie organiques du fait de la forte concentration de ces algues. L'utilité de définir le bassin versant est donc double, d'une part cela permet de mieux comprendre le système qui gravite autour du lac Pavin, et d'autre part cela permet de le protéger d'une partie des actions humaines puisque les algues croissent grâce aux intrants qui se déversent ou sont drainé dans le lac.

Comme dit précédemment, le niveau du lac du Pavin a évolué au cours du temps et l'on note deux baisses notables. La plus récente date du XVIII<sup>e</sup> siècle et correspond au creusement de l'exutoire avec une baisse de 4 mètres (Meybeck et al., 2016) et la plus ancienne de AD600 et correspond à la chute de ce niveau de 5 mètres (Chapron et al., 2010). Ce brusque changement du niveau résulte d'une rupture du cratère suite à un séisme. Si l'on extrait les isolignes + 4 mètres et + 9 mètres correspondants de la carte topobathymétrique, on obtient deux Modèles Numériques de Terrain dont on calcule les volumes avec la fonction *Surface – Fonction* dans *3D Analyst*. En soustrayant ces deux valeurs, on obtient le volume de 1 457 609 mètres cubes d'eau qui correspond au volume perdu lors de la rupture de AD600. Cependant on observe sur les rives du lac l'absence de repère relatif à ce changement d'altitude du niveau du lac. Or une telle chute aurait dû laisser des marques sur le rivage. Sur l'annexe 16.a on remarque que le chemin était immergé en AD600 sur toute la partie ouest. On peut donc déduire que le chemin découle du changement du niveau (annexe 16.b) et que ces aménagements ont probablement détruit les anciens dépôts lacustres du Pavin. Les mesures physiques permettent de calibrer la cartographique.

Les études qui découlent de l'analyse des carottes sont réalisables grâce à l'emploi de mesures physiques. On pense tout d'abord à la spectrorimétrie (annexe 17) qui permet de mettre en exergue les zones que l'on définit visuellement comment des zones de dépôt d'éruption limnique, zone où le sédiment tend vers le jaune. Sur les cartes spectrales les dérivées 525 nm et 445 nm qui sont les marques d'oxyde de fer et de goethite y sont fortes en ces zones (Debret et al 2011). C'est grâce à cela que l'on peut définir les zones d'échantillonnage pour la perte au feu ou déterminer les carottes qui seront envoyées à l'XRF, ici l'ITRAX du CEREGE.

Le rôle de la sismique est le même. Dans l'annexe 18, on observe un faciès chaotique à transparent proche de la surface qui correspond à un glissement de terrain, et c'est donc ici qu'ont été prélevées diverses carottes pour l'étude de l'évènement AD600.

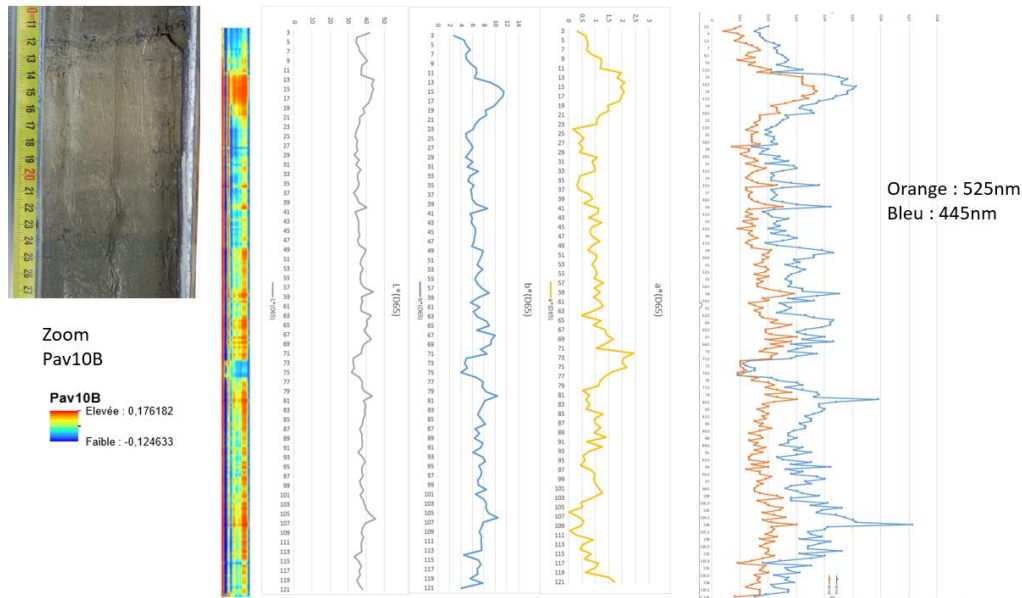


Figure 24 : Carte spectrale Pav10-B, dérivée des longueurs d'onde 525nm et 445nm : marqueur de la goethite

Après l'acquisitions des données ci-dessus sur la carotte Pav10-B, on remarque sur la carte spectrale qu'à l'endroit de la photographie où l'on suspecte la présence de dépôt d'éruption limnique — entre 12 et 23 cm de profondeur — il y a une anomalie rouge. Une fois cette zone délimitée avec un proxy on en cherche d'autre (figure 25).

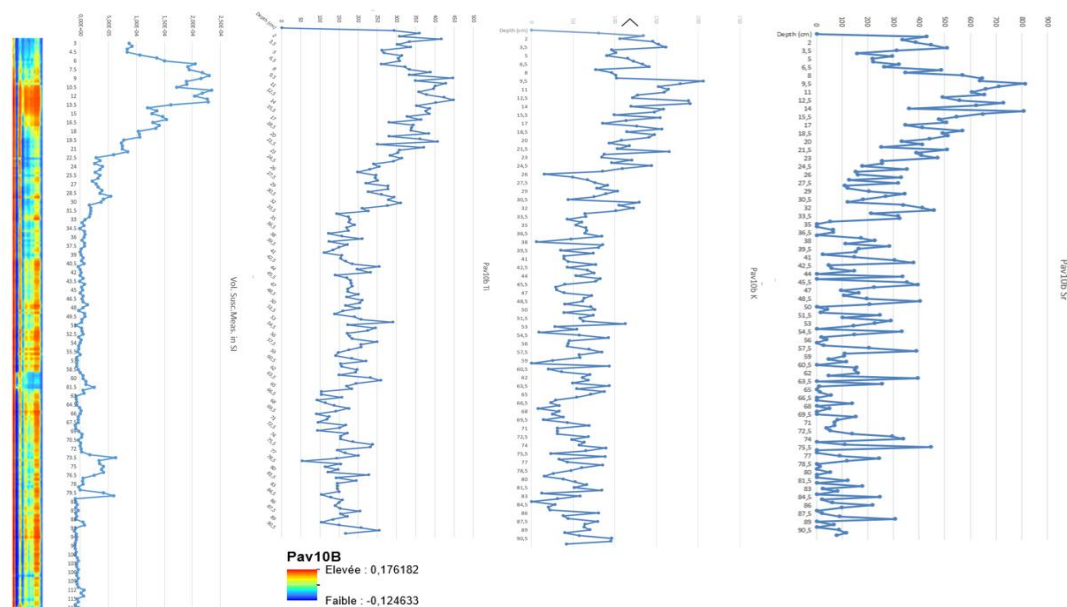


Figure 25 : Carte spectrale Pav10-B, susceptibilité magnétique et teneur en titane, potassium et strontium suite à l'XRF du CEREGE

On remarque ici une forte susceptibilité magnétique au même endroit que précédemment. De plus, on sait que lors d'une éruption limnique les eaux du lac deviennent ocres on pense donc que cette variation de susceptibilité magnétique provient de là. Pour valider cette théorie, il faut avoir l'image des composants de la carotte en divers points. Pour cela on utilise l'XRF (annexe 10). Seuls trois éléments présentent un comportement notable dans la zone : le titane, le potassium et le strontium. De plus cette variation est aussi présente dans l'XRF de la carotte Pav09-C1 et C3 (annexe 17). Pour valider cet XRF, nous avons passé les échantillons obtenus lors de la perte au feu à l'XRF du laboratoire GEODE et obtenu sensiblement les mêmes résultats (annexe 10).

Ce sont donc des marqueurs potentiels cependant il n'y a pas de véritable variation du taux de fer et de changement important dans la constitution de cette zone marquée par l'éruption limnique. On suppose donc que la sédimentation lors d'une éruption limnique est la même et donc que la modification se fait par l'oxydoréduction du fer avec la présence de goethite (Debret et al., 2010). Pour vérifier cela il est nécessaire de faire une dérivée des longueurs d'onde 525 nm et 445 nm qui sont des marqueurs de l'ion fer et l'on remarque ici un pic important entre 12 et 23 cm. On note aussi suite à la perte au feu une teneur en eau plus importante des dépôts d'éruption limnique (annexe 11) qui pourrait résulter d'une captation des eaux par le sédiment lors du glissement de terrain et c'est en captant cette eau que le sédiment d'éruption limnique se chargerait en goethite.

Les mesures effectuées sur la carotte Pav10-B ont aussi été réalisées sur les autres carottes (annexe 17). Cela permet de montrer la présence de dépôt d'éruption limnique à divers endroits du plateau en utilisant les marqueurs énoncés dans le paragraphe précédemment. Pour la Pav09-C4 on remarque que la susceptibilité magnétique est bien plus faible et que la carte spectrale n'est pas présentée avec une légende de valeurs étendues, mais avec des valeurs classées, car sinon l'on obtient une carte spectrale unie. On peut donc en conclure que comme la Pav09-C4 ne possède pas de dépôt d'éruption limnique, mais que sa localisation et la dérivée de  $L^*$  proche de celles des échantillons possédant des dépôts limniques, elle est en limite de zone de dépôt.

Lorsque l'on fait une carte d'épaisseur des dépôts, on observe la présence de dépôt d'éruption limnique au centre du lac sur la carotte Pav09-B1. On remarque également grâce à la carte des pentes réalisée avec ArcMap, la présence d'un canyon ayant permis le déplacement des sédiments vers le fond du lac.

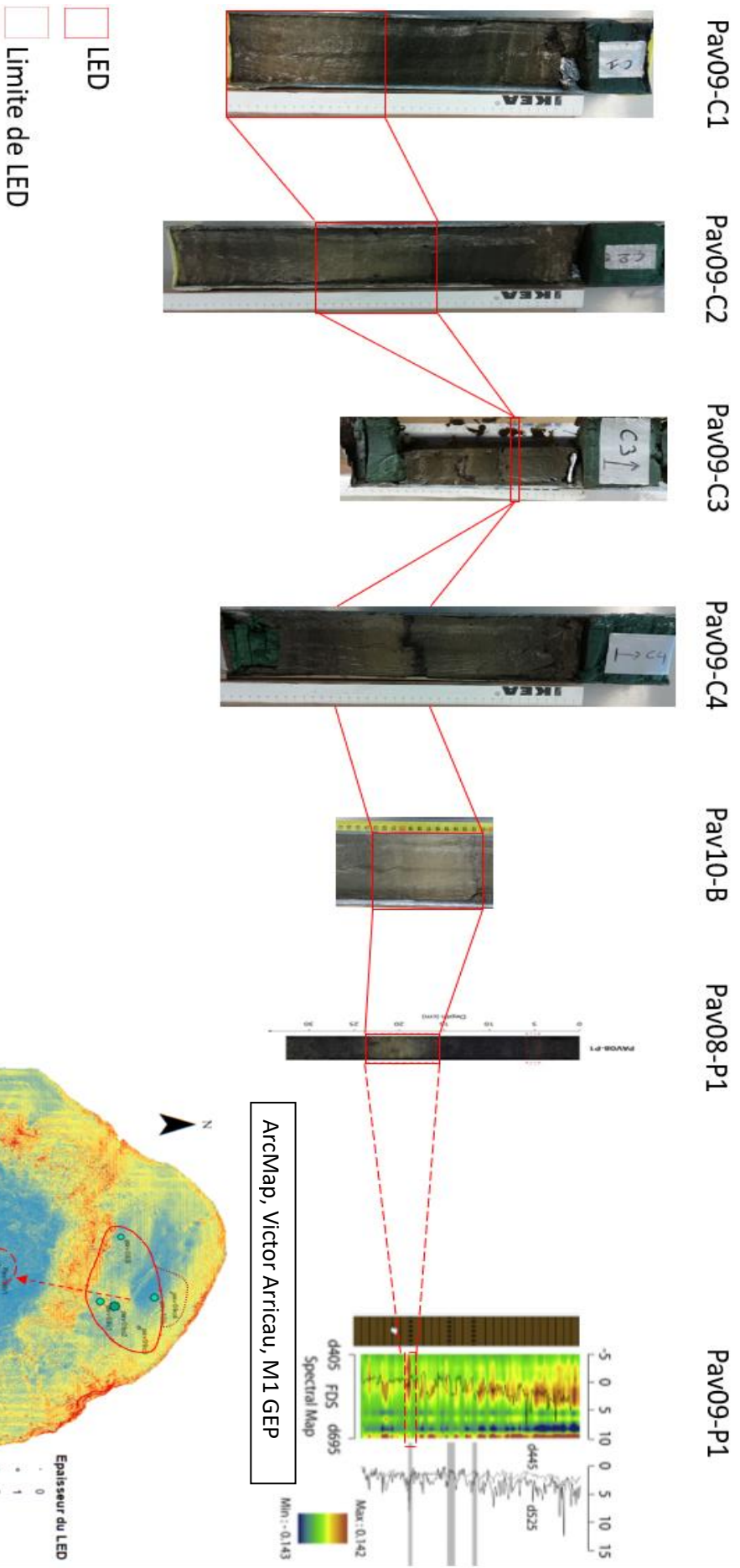
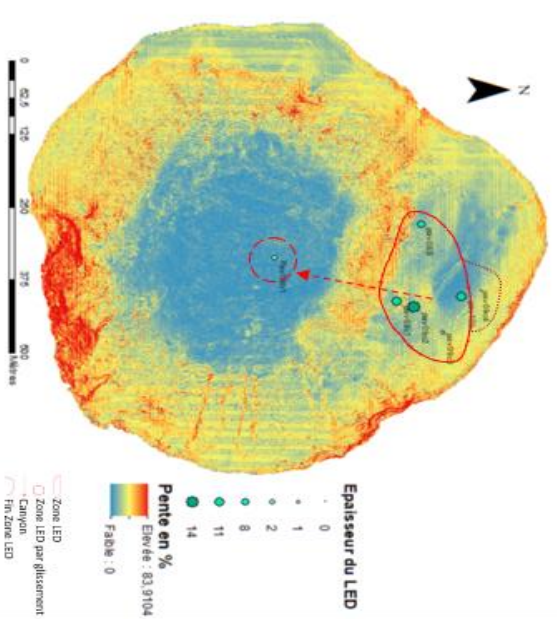


Figure 26 : Ensemble des carottes contenant des traces de dépôt d'éruption limnique et carte d'épaisseur



Enfin dans des carottes Pav08-P1 on observe la présence d'une autre anomalie dans la carte spectrale (Chapron, et al., 2010). On remarque dans la partie C la présence d'une signature forte à 5 cm qui correspond à la datation 1915 $\pm$  5 ans. Or d'après les recherches de Meybeck (Meybeck et al. 2019) une autre trombe aurait eu lieu en 1929 et ceci pourrait en être sa signature compte tenu des incertitudes chronologiques du modèle d'Âge-profondeur basé sur deux âges C14 sur cette carotte (Chassiot et al, 2016, annexe 2).



## Conclusion

Au terme de cette étude, il ressort de ce travail de géomaticien ne peut se couper des mesures physiques tout comme le scientifique de terrain ne peut faire abstraction de l'emploi de la géomatique pour comprendre au mieux son objet d'étude. Pour l'étude du lac de Loures-Barousse, il serait pertinent de vérifier si la séquence fluviale se vérifie dans d'autres lacs présentant les mêmes particularités. On peut penser au lac de Géry en amont du lac de Loures-Barousse. Nonobstant, cela demanderait une campagne de cartographie et de carottage de ce lac. Une solution plus facile pour confronter les sédiments de crue de la séquence lacustre est le prélèvement de sédiments dans le monticule de limon créé après la crue de 2013 dans le parc du lac de Loures-Barousse qui permettrait de montrer des similitudes dans la composition de ces sédiments. La reconstruction du paléolac peut aider à la compréhension des sites archéologiques et potentiellement valider des datations de site grâce à la variation du niveau du lac et permettre de mieux comprendre le rapport de ces individus au lac et à la ressource qu'il représente.

Pour le lac Pavin, l'analyse topobathymétrique permet de mieux déterminer les zones potentiellement porteuses de dépôts d'éruption limnique en localisant les zones de reflat ou la fin des canyons. Pour le futur de cette étude, on pense tout d'abord à une nouvelle campagne de carottage afin d'avoir une maille plus serrée autour de l'évènement AD600. Pour valider la présence d'ion fer dans les échantillons il faudrait passer l'échantillon à l'ICP-MS qui est un type de spectromètre de masse en capacité de détecter les métaux en concentration très faible afin de déceler la présence d'ion fer et d'ainsi valider cette théorie. De plus, la présence de dépôt ayant une signature proche de celle des dépôts d'éruption limnique pourrait valider la thèse d'une seconde éruption limnique en 1929, mais il faudrait d'autres carottes pour d'une part vérifier la présence de ce dépôt sur d'autres carottes et d'autre part pour avoir une idée plus précise de l'étendue du dépôt au sein du lac et ainsi de son intensité. Cela pose donc la question sur le rôle de ces glissements de terrain sur le développement de la méromictique du Pavin et sur la formation d'éruption limnique dans ce lac de cratère.

D'un point de vue personnel, ce stage m'a permis d'avoir un premier contact enrichissant avec le monde de la recherche par le prisme d'un stage pluridisciplinaire balayant à la fois le champ des SIG et des manipulations tant en laboratoire que sur le terrain. Cette découverte m'a conforté dans mon choix d'orientation suite au Master 2 GEP pour postuler à

une bourse de thèse afin de travailler sur l'emploi de la géomatique et ses apports aux études de milieux lacustres ou fluviaux.

## Bibliographie

V. Andrieu, G. Jalut, J. Hubschman, G. Herail (1988) Chronologie de la dégladation des Pyrénées françaises. Dynamique de sédimentation et contenu pollinique des paléolacs ; application à l'interprétation du retrait glaciaire in : Quaternaire, 25-2-3, pp. 55-67

J.-M. Antoine (1989) Torrentialité en val d'Ariège : des catastrophes passées aux risques présents in : Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest. Sud-Ouest Européen 60-4 pp. 521–534

N. Assayag, D. Jézéquel, M. Ader, E. Viollier, G. Michard, F. Prévôt et P. Agrinier (2008) Hydrological budget, carbon sources and biogeochemical processes in Lac Pavin (France): Constraints from  $\delta^{18}\text{O}$  of water and  $\delta^{13}\text{C}$  of dissolved inorganic carbon in: Applied Geochemistry, Volume 23, Issue 10, October 2008, Pages 2800–2816

P. Boivin, S. Jouhannel (2016) Chapitre 5 The Origin of Lake Pavin: Two Centuries of Controversy in: T. Sime-Ngando, P. Boivin, E. Chapron, D.r Jézéquel, M. Meybeck (2016) Lake Pavin History, geology, biogeochemistry and sedimentology of a deep meromictic maar lake, Springer. (2018) 218–233, pages 91–104

M. Debret, E. Chapron, M. Desmet, M. Rolland-Revel, O. Magand, A. Trentesaux, V. Bout-Roumazeille, J. Nomade, F. Arnaud (2010) North-western Alps Holocene paleohydrology recorded by flooding activity in Lake Le Bourget, France in: Quaternary Science Reviews Volume 29, Issues 17–18, August 2010, Pages 2185–2200

M. Debret, D. Sebag, M. Desmet, W. Balsam, Y. Copard, B. Mourier, A.-S. Susperrigui, F. Arnaud, I. Bentaleb, E. Chapron, E. Lallier-Vergès, T. Winiarski (2011) Spectrocolorimetric interpretation of sedimentary dynamics: The new “Q7/4 diagram” in: Earth-Science reviews 109 pp. 1–19.

E. Chapron, F. Arnaud, A. Marguet, Y. Billaud, L. Perdereau, M. Magny (2007) Évolution des paléoenvironnements alpins durant L'Âge du Bronze : apports des archives sédimentaires littorales et profondes du Lac du Bourget (Savoie, France) in : Évolution des paléoenvironnements alpins durant l'Âge du Bronze, Éditions du CTHS, Paris, pp.399, 2007

E. Chapron, P. Albéric (2008) Carottage et datation des sédiments du flanc nord du cratère du lac Pavin in : Rapport d'étude projet DDE, 2008.

- E. Chapron, P. Albéric, D. Jézéquel, W. Versteeg, J.-L. Bourdier, et J. Sitbon (2010) Multidisciplinary characterization of sedimentary processes in a recent maar lake (Lake Pavin, French Massif Central) and implication for natural hazards in: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 1815–1827.
- E. Chapron (2010) Lac Pavin mauvaise réputation ou récente éruption ? in: *Éruption Objectif Volcans* n° 23.
- E. Chapron, G. Ledoux, A. Simonneau, P. Albéric, G. St-Onge, P. Lajeunesse, P. Boivin, M. Desmet Chapter 23 New Evidence of Holocene Mass Wasting Events in Recent Volcanic Lakes from the French Massif Central (Lakes Pavin, Montcineyre and Chauvet) and Implications for Natural Hazards in: *Submarine Mass Movements and Their Consequences, Advances in Natural and Technological Hazards Research* 31, Springer.
- E. Chapron (2016) EDiFiS « Éléments de Diagnose des sédiments Fluviaux Stockés à l’amont des retenues sur cours d’eau avant effacement », Rapport scientifique.
- E. Chapron, A. Simonneau, G. Ledoux, F. Arnaud, P. Lajeunesse, et P. Albéric (2016) French Alpine Foreland Holocene Paleoseismicity Revealed by Coeval Mass Wasting Deposits in Glacial Lakes in: G. Lamarche et al. (eds.), *Submarine Mass Movements and their Consequences, Advances in Natural and Technological Hazard Research* 41, chapter 34, pp. 341–349
- L. Chassiot, E. Chapron, C. Di Giovanni, P. Albéric, P. Lajeunesse, A-C. Lehours, M. Meybeck (2016) Extreme events in the sedimentary record of maar Lake Pavin: Implications for natural hazards assessment in the French Massif Central in: *Quaternary Science Reviews* 141 9–25.
- L. Chassiot, E. Chapron, C. Di Giovanni, P. Lajeunesse, K. Tachikawa, M. Garcia, E. Bard (2016) Historical seismicity of the Mont Dore volcanic province (Auvergne, France) unravelled by a regional lacustrine investigation: New insights about lake sensitivity to earthquakes in: *Sedimentary Geology* 339 (2016) 134–150.
- L. Chassiot, Y. Miras, E. Chapron, A-L. Develle, F. Arnaud, M. Motelica-Heino, C. Di Giovanni (2018) A 7000-year environmental history and soil erosion record inferred from the deep sediments of Lake Pavin (Massif Central, France) in: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 497 pp. 218-233
- N. Guimard (2017) Parc naturel régional des Volcans d’Auvergne - Contrat territorial des lacs de la tête de bassin de la couze Pavin.

- A. Gourgeaud (2016) Chapitre 4 Volcanism of the Mont Dore (French Massif Central) in: T. Sime-Ngando, P. Boivin, E. Chapron, D.r Jézéquel, M. Meybeck (2016) Lake Pavin History, geology, biogeochemistry and sedimentology of a deep meromictic maar lake, Springer. (2018) 218–233, pages 83–90
- H. Leyrit (2016) Chapitre 6 Characterization of Phreatomagmatic Deposits from Eruption of the Pavin Maar (France) in: T. Sime-Ngando, P. Boivin, E. Chapron, D.r Jézéquel, M. Meybeck (2016) Lake Pavin History, geology, biogeochemistry and sedimentology of a deep meromictic maar lake, Springer. (2018) 218–233, pages 105–128
- L. Löwermark, H.-F. Chen, T.-N. Yang, M. Kylander, E.-F. Yu, Y.-W. Hsu, T.-Q. Lee, S.-R. Song, S. Jarvis Normalizing XRF-scanner data: A Cautionary note on the interpretation of high-resolution records from organic-rich lakes in *Journal of Asian Earth Sciences* – 40 1250–1256
- M. Meybeck (2016) Chapitre 1 Pavin, the Birthplace of French Limnology (1770–2012) and its Degassing Controversy in: T. Sime-Ngando, P. Boivin, E. Chapron, D.r Jézéquel, M. Meybeck (2016) Lake Pavin History, geology, biogeochemistry and sedimentology of a deep meromictic maar lake, Springer. (2018) 218–233, pages 3–28
- M. Meybeck (2016) Chapitre 2 Pavin, A Rich but Fragmented History (200 Ad-2016) in: T. Sime-Ngando, P. Boivin, E. Chapron, D.r Jézéquel, M. Meybeck (2016) Lake Pavin History, geology, biogeochemistry and sedimentology of a deep meromictic maar lake, Springer. (2018) 218-233, pages 29 - 252
- M. Meybeck (2019) Les dégazages ignorés du Pavin, le terrifiant lac-maar d’Auvergne in : *Géochroniques* n° 150, Printemps 2019. Pages 9
- S. Perrouty, et al. (2015) Geometry of two glacial valleys in the northern Pyrenees estimated using gravity data *C. R. Geoscience*
- T. Sime-Ngando, P. Boivin, E. Chapron, D.r Jézéquel, M. Meybeck (2016) Lake Pavin History, geology, biogeochemistry and sedimentology of a deep meromictic maar lake, Springer. (2018) 218–233.
- A. Simonneau, Protocole LOI (2013) GEODE.
- A. Sturma, J.-M. Antoine, S. Becerra, A. Peltier (2017) La crue de juin 2013 dans les Pyrénées garonnaises : de la crise hydrologique au territoire en crise Sud-Ouest Européen N° 44, 2017.



M. Tchindjang (2018) Lake Nyos, a Multirisk and Vulnerability Appraisal Geosciences 2018, 8, 312.

H. Zouzou (2016) Identification des séismes historiques et préhistoriques dans les sédiments lacustres des Pyrénées centrales françaises : Les lacs de Lourdes et d'Orédon. Mémoire de Master 2, Université Paris, 65 pages

H. Zouzou (2017) Validation d'un processus de captation de données bathymétriques et sédimentation par drone marin pour l'analyse 3D de l'épaisseur de sédiment. Rapport de fin d'étude, Master 2, Université Toulouse Jean Jaurès, 67 pages

Géoconfluence disponible à l'adresse suivante :

<http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/risque-s>

## Annexes

Annexe 1 .....	51
Annexe 2 .....	52
Annexe 3 .....	53
Annexe 4 .....	54
Annexe 5 .....	55
Annexe 6 .....	56
Annexe 7 .....	57
Annexe 8 .....	58
Annexe 9 .....	59
Annexe 10 .....	60
Annexe 11 .....	61
Annexe 12 .....	62
Annexe 13 .....	63
Annexe 14 .....	64
Annexe 15 .....	65
Annexe 16 .....	66
Annexe 17 .....	67
Annexe 18 .....	73

## Annexe 1 Représentation du lac Pavin

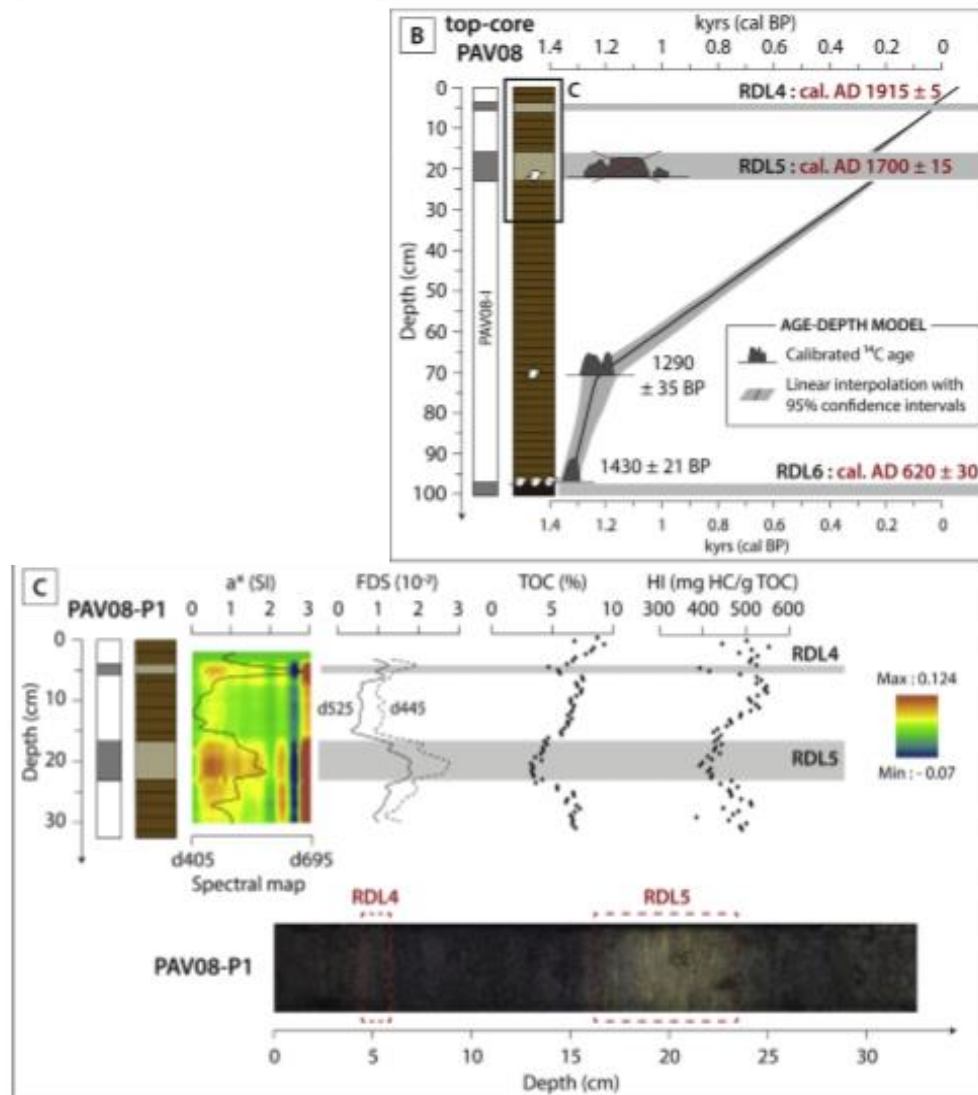
### 1.a Complexe MontChal-Pavin, Chapron 2010



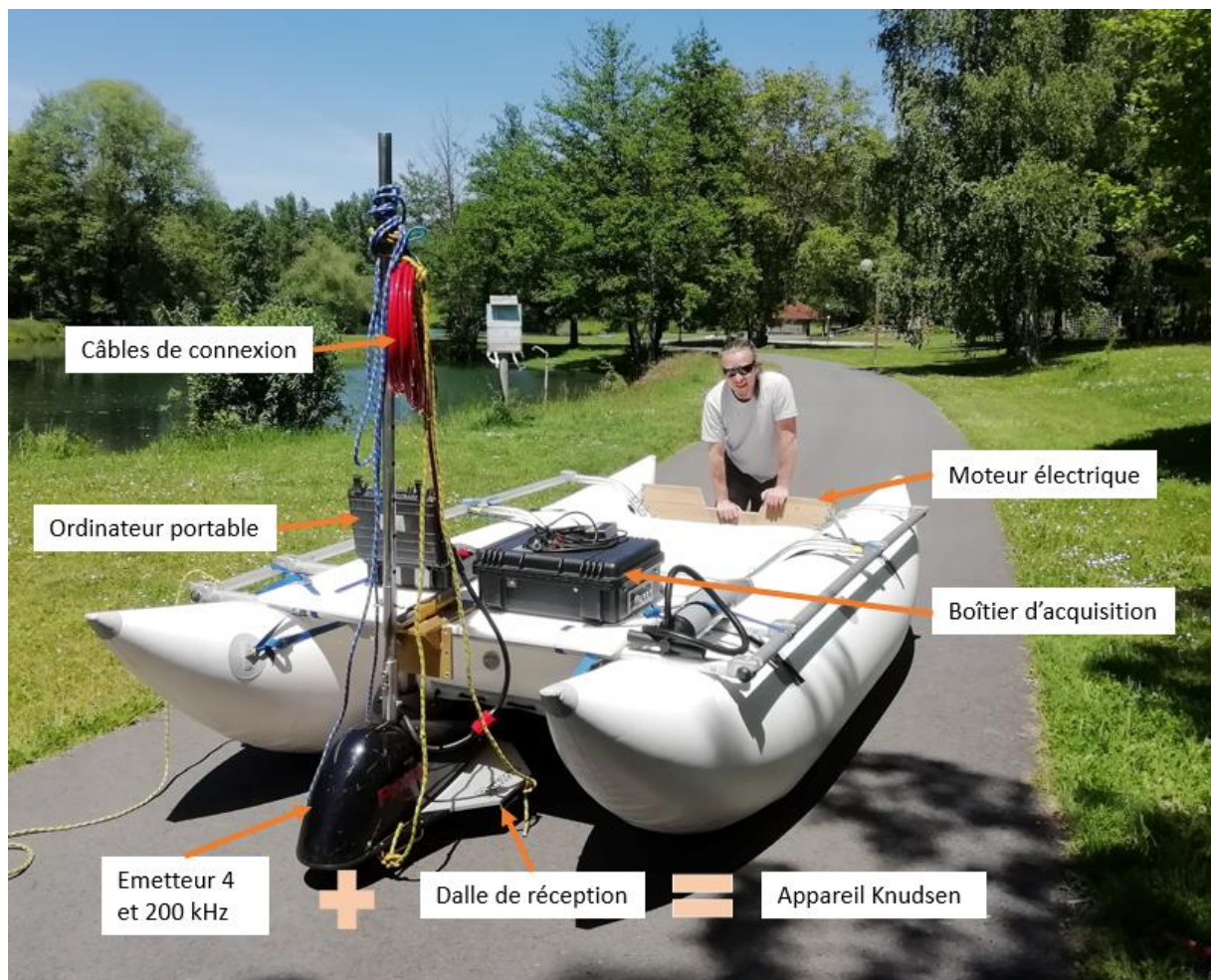
### 1.b Dessin de Lecoq, 1835, représentant l'exutoire du Pavin et le cône de scorie du Montchal, Meybeck, 2016



Annexe 2 : Datation de la carotte Pav08-P1 (Chassiot et al., 2016) et Carte spectrale Pav08-P1 (Chapron et al., 2010)

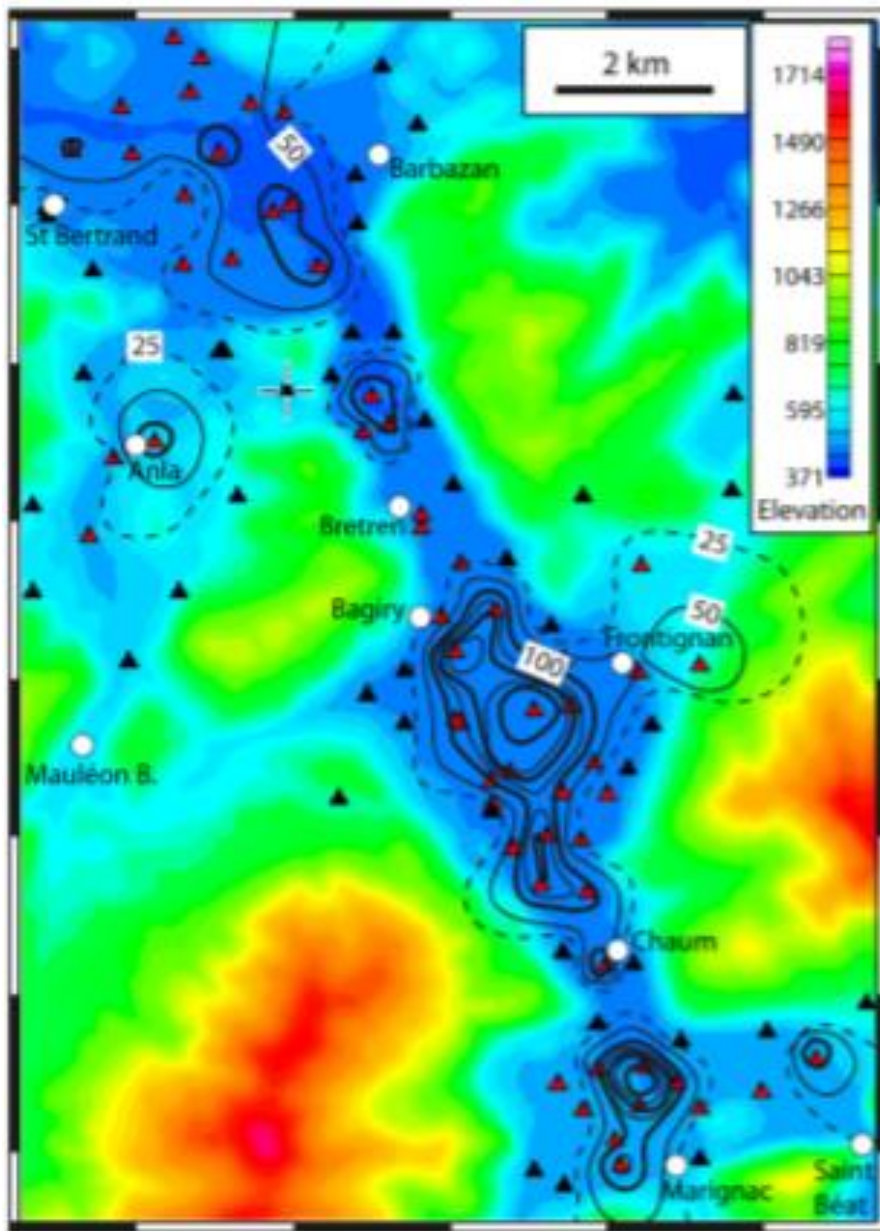


Annexe 3 : matériel utilisé pour la cartographie sismique réflexion de type « chirp »

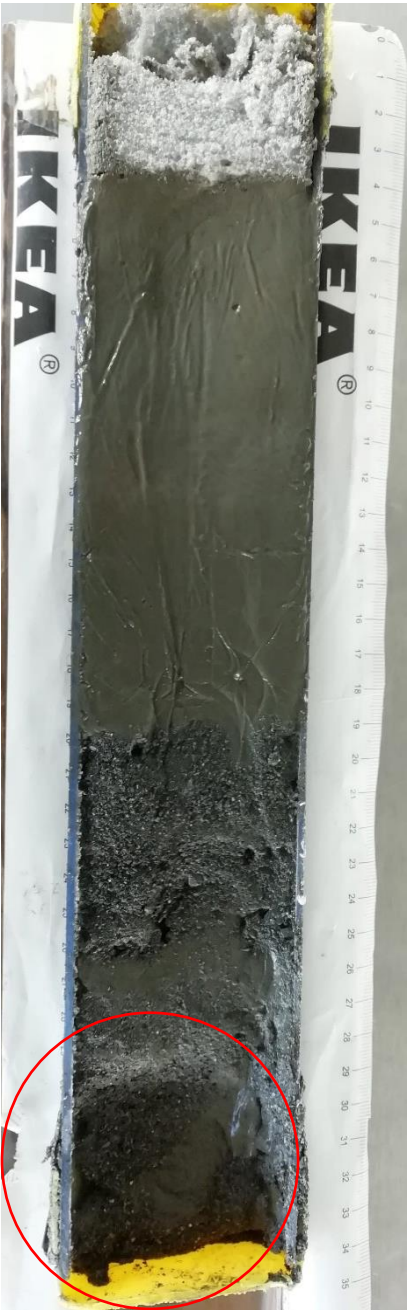




Annexe 4 : Carte des anomalies gravimétriques de Perrouty et al. 2015



Annexe 5 : Photographies de la carotte LLB19-A



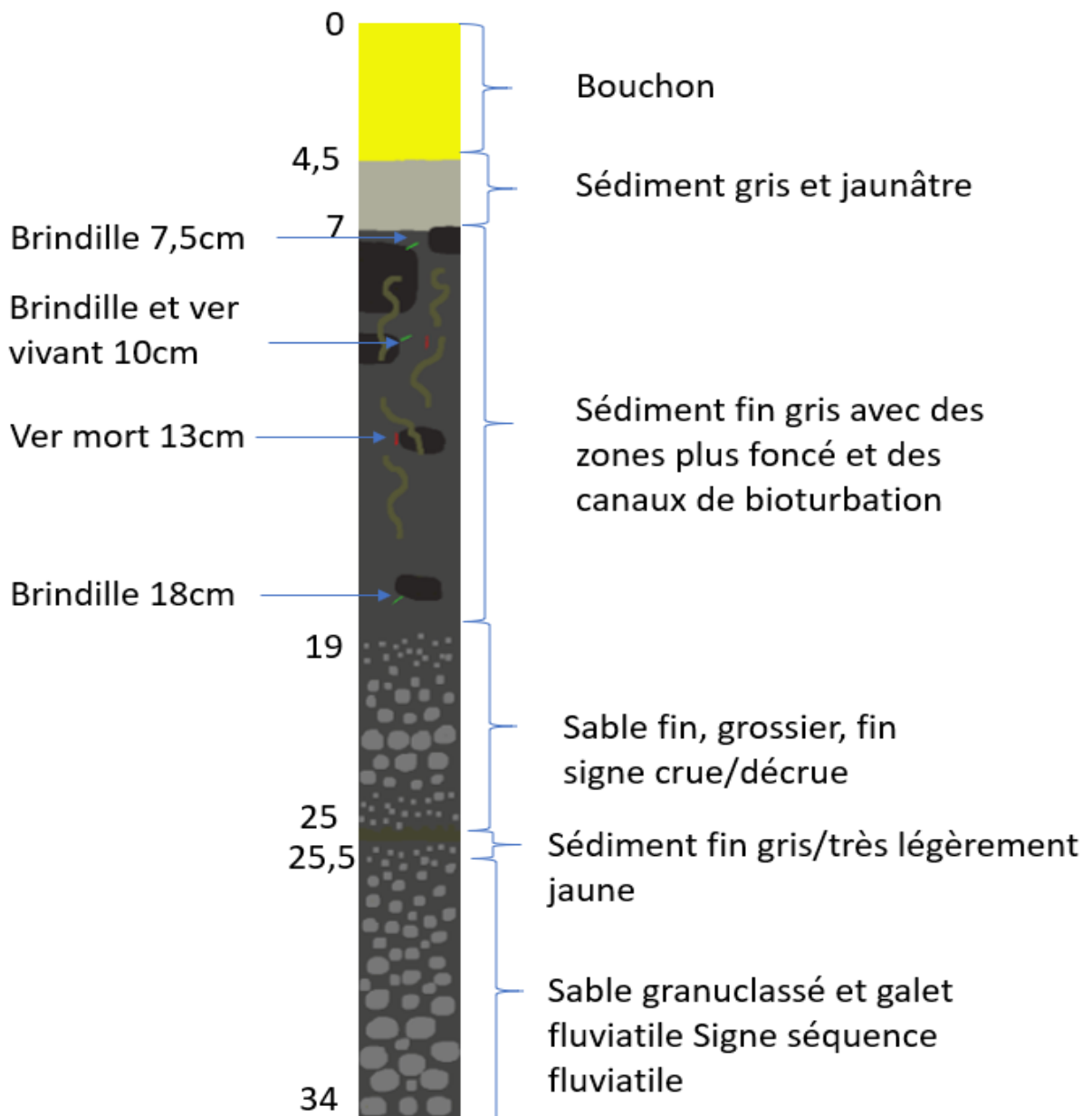
Top



Bottom

Carotte LLB19-A sans et avec le galet fluviatile.

Annexe 6 : Croquis de la carotte LLB19-A

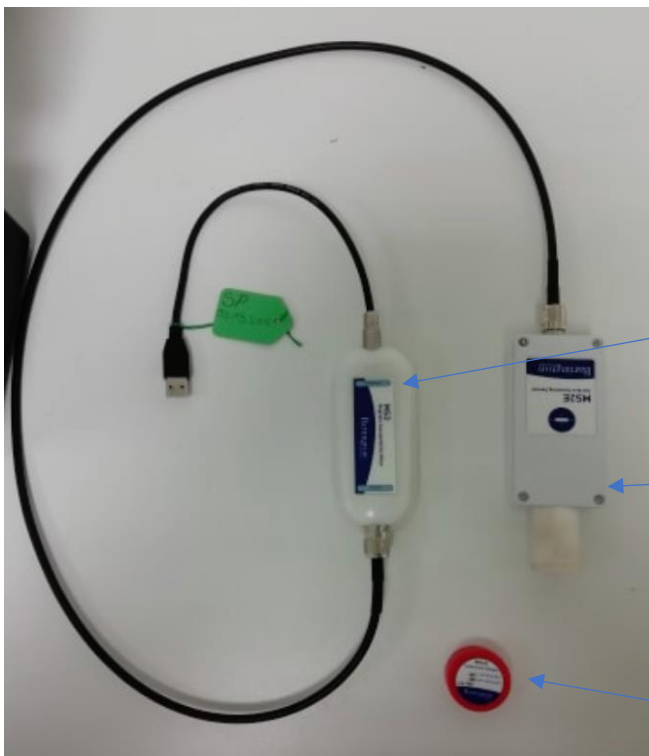


Annexe 7 : Photographie du spectromètre (a) et de l'appareil de Susceptibilité magnétique dans la cage de faraday (b)



Spectromètre vu de côté et de dessus.

Objectif 0,5 mm + cache



Susceptibilimètre

Capteur

Pastille pour configuration

Annexe 8 : fichier spectrométrie prêt à être exporté

	A	B	C	D
1	X	Y	Z	
2	25	405	0,019	
3	50	405	0,018	
4	75	405	0,016	
5	100	405	0,016	
6	125	405	0,015	
7	150	405	0,015	
8	175	405	0,016	
9	200	405	0,019	
10	225	405	0,018	
11	250	405	0,018	
12	275	405	0,017	
13	300	405	0,021	
14	325	405	0,021	
15	350	405	0,019	
16	375	405	0,021	
17	400	405	0,022	
18	425	405	0,018	
19	450	405	0,021	
20	475	405	0,018	
21	500	405	0,018	
22	525	405	0,021	
23	550	405	0,023	
24	575	405	0,019	
25	600	405	0,019	
26	625	405	0,02	
27	650	405	0,017	
28	675	405	0,013	
29	700	405	0,013	

Ici le champ X, profondeur, est multiplié par 50 afin d'avoir une carte spectrale suffisamment étendue pour qu'elle soit lisible ; Y correspond à la longueur d'onde du point et Z correspond à la valeur.



Annexe 9 : Photographie de la Pav09-C2



La Pav10-B faisant plus d'un mètre n'a pas pu être photographié de façon pertinente d'une seule fois, il me semble donc plus logique de mettre la carotte Pav09-C2 qui est étudiée ici.

## Annexe 10 : Exemple de tableau obtenu suite à un XRF

### 10.a : XRF du CEREGE, ITRAX

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	C:\Data\2019\Mo\PAVIN\PAV10_8	XRF data	4/5/2019	re-evaluated data															
2	filename	position (mm Depth (cm)	validity	kcps	MSE	Ar	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Br	Rb	Sr	Zr	Mo inc	Mo coh	inc/coh
3	C:\Data\Data	10	1	1 32560,08884	1,22	117	77	80	323	292	223	8993	617	22	428	1504	66231	11119	5,96
4	C:\Data\Data	15	1,5	1 32570,97461	1,41	174	114	134	297	358	210	9019	478	49	334	1347	66462	11081	6,00
5	C:\Data\Data	20	2	1 32659,0957	1,31	106	84	106	293	306	170	8722	418	324	386	1381	66368	11490	5,78
6	C:\Data>Data	25	2,5	1 32660,35742	1,34	135	63	145	291	416	198	9619	232	444	446	1406	66822	10799	6,19
7	C:\Data>Data	30	3	1 32816,02344	1,36	116	94	152	289	332	152	9212	552	123	507	1427	66293	10885	6,09
8	C:\Data>Data	35	3,5	1 33423,14453	1,23	113	137	161	372	301	151	9219	391	38	312	1674	68372	11088	6,17
9	C:\Data>Data	40	4	1 33764,31641	1,38	119	104	96	283	335	143	8540	399	278	158	1308	70144	11337	6,19
10	C:\Data>Data	45	4,5	1 30370,0332	1,21	123	115	101	248	261	210	7035	462	75	294	1666	62738	10591	5,92
11	C:\Data>Data	50	5	1 31815,67578	1,38	110	102	90	212	266	136	6721	361	269	218	1204	65717	10766	6,10
12	C:\Data>Data	55	5,5	1 32573,27344	1,26	84	138	115	270	313	162	7928	511	0	220	1333	66751	11044	6,04
13	C:\Data>Data	60	6	1 32582,43945	1,24	152	131	122	320	304	191	7785	458	173	320	1525	66722	11202	5,96
14	C:\Data>Data	65	6,5	1 32339,77344	1,4	120	136	133	284	307	211	8114	248	197	263	1378	66441	11443	5,81
15	C:\Data>Data	70	7	1 32402,95117	1,26	100	87	141	280	259	144	7436	403	248	483	1407	65078	11171	5,83
16	C:\Data>Data	75	7,5	1 32135,76172	1,28	100	120	77	274	321	179	7657	302	0	344	1340	65302	10834	6,03
17	C:\Data>Data	80	8	1 32084,57813	1,24	103	122	96	326	332	195	8600	256	485	566	1518	64414	11277	5,71
18	C:\Data>Data	85	8,5	1 31982,51758	1,19	136	145	101	333	386	200	9459	636	119	644	1671	64421	10781	5,98
19	C:\Data>Data	90	9	1 31761,73242	1,36	90	149	102	297	332	200	8886	212	379	635	1377	63930	11159	5,73
20	C:\Data>Data	95	9,5	1 31673,93555	1,28	152	129	206	319	446	199	9450	268	255	810	1505	63692	11261	5,66
21	C:\Data>Data	100	10	1 31678,32091	1,28	120	123	178	353	348	209	9841	151	226	709	1374	63125	11169	5,65
22	C:\Data>Data	105	10,5	1 31555,5957	1,24	135	119	152	392	427	234	9694	197	489	658	1279	62826	11215	5,60
23	C:\Data>Data	110	11	1 31367,99609	1,29	171	143	164	364	399	214	9536	197	360	605	1336	62554	10799	5,79
24	C:\Data>Data	115	11,5	1 31448,85547	1,28	153	125	159	352	395	202	9405	42	527	651	1285	62051	10763	5,77
25	C:\Data>Data	120	12	1 31282,99023	1,34	119	149	127	359	357	126	8896	334	49	491	1261	62403	10947	5,70
26	C:\Data>Data	125	12,5	1 31175,79492	1,18	145	149	121	313	376	241	9358	256	500	556	1545	62438	10850	5,75
27	C:\Data>Data	130	13	1 30979,54883	1,45	148	161	188	358	422	178	9550	225	239	727	1575	61617	10856	5,68
28	C:\Data>Data	135	13,5	1 30871,75195	1,39	101	149	190	335	447	152	9737	271	227	621	1536	61019	10706	5,70
29	C:\Data>Data	140	14	1 30816,21484	1,23	132	133	119	381	401	197	9510	287	251	360	1477	61431	10891	5,64
30	C:\Data>Data	145	14,5	1 30854,82617	1,22	139	113	158	319	351	221	9579	222	92	806	1459	61695	11028	5,59
31	C:\Data>Data	150	15	1 30963,41406	1,13	100	155	147	310	385	234	9506	227	251	646	1539	61171	10956	5,58
32	C:\Data>Data	155	15,5	1 30760,63086	1,24	141	155	99	335	375	193	9884	262	147	543	1284	61895	10629	5,82
33	C:\Data>Data	160	16	1 30904,75	1,31	143	167	154	369	384	159	9407	124	199	475	1212	61923	10991	5,63
34	C:\Data>Data	165	16,5	1 31016,01172	1,28	159	178	113	314	327	216	8861	394	21	503	1150	63666	10769	5,82
35	C:\Data>Data	170	17	1 31173,55469	1,28	143	148	85	289	362	187	8400	391	221	345	1383	62675	10983	5,71
36	C:\Data>Data	175	17,5	1 30803,41406	1,2	134	143	126	295	280	240	8757	333	0	410	1050	61381	10884	5,64
37	C:\Data>Data	180	18	1 30877,07617	1,29	88	129	156	257	343	197	9189	88	292	566	1282	61490	10996	5,59

Le code couleur qui surligne les éléments indique la fiabilité de la mesure.

Vert foncé : Très fiable

Vert Clair : fiable

Orange : Peu fiable

### 10.b : XRF du laboratoire GEODE

Reading No	Time Type	Duration	Units	SAMPLE	Flags	Mo	Zr	Sr	Rb	Se	Fe	Ti	K	Si
5 ###	Soil	180 ppm	Pav 10 B 19-20			17,56	88,07	78,33	27,61	<LOD	15394,98	1359,88	2361,4	
6 ###	Soil	180 ppm	Pav 10 B 28-29			21,35	76,68	74,96	25,69	<LOD	17921,96	1381,22	2179,61	
7 ###	Soil	180 ppm	Pav 10 B 49-50			20,22	61,55	59,83	19,99	<LOD	14590,2	1118,34	1839,22	
8 ###	Soil	180 ppm	Pav 10 B 68-69			27,5	40,71	32,06	14,69	<LOD	40766,19	689,3	1168,73	
9 ###	Soil	180 ppm	Pav 10 B 3-4			17,87	101,65	79,12	41,57	<LOD	20779,12	1743,36	3128,45	
10 ###	Soil	180 ppm	Pav 10 B 6-7			18,98	85,6	95,28	34,15	<LOD	15958,29	1596,78	2883,09	
11 ###	Soil	180 ppm	Pav 10 B 9-10			17,46	109,08	112,32	36,17	<LOD	12842,1	1705,23	3187,17	
12 ###	Soil	180 ppm	Pav 10 B 13-14			16,59	112,9	110,15	33,28	<LOD	15309,38	1642,38	2895,86	
13 ###	Soil	180 ppm	Pav 10 B 16-17			17,93	111,1	86,98	28	<LOD	13473,22	1501,39	2783,31	
14 ###	TestAll Geo	120 ppm	Pav 10 B 3-4	-8mm		12,01	89,86	72,94	28,91	<LOD	24358,33	1454,16		483837,09
15 ###	TestAll Geo	120 ppm	Pav 10 B 6-7	-8mm		11,17	81,93	85,57	24,28	<LOD	19307,97	<LOD		453797,16
16 ###	TestAll Geo	120 ppm	Pav 10 B 9-10	-8mm		16,72	112,39	113,12	27,92	<LOD	16020,01	<LOD		378382,19
17 ###	TestAll Geo	120 ppm	Pav 10 B 13-14	-8mm		11,56	100,11	98,68	26,41	<LOD	18713,12	<LOD		453664,28
18 ###	TestAll Geo	120 ppm	Pav 10 B 16-17	-8mm		11,62	90,58	76,29	21,98	<LOD	16838,81	<LOD		422073,88
19 ###	TestAll Geo	120 ppm	Pav 10 B 19-20	-8mm		12,74	79,92	69,87	18,86	<LOD	19237,41	<LOD		487536,06
20 ###	TestAll Geo	120 ppm	Pav 10 B 28-29	-8mm		12,22	69,17	67,95	19,49	<LOD	22297,41	987,45		492116,44
21 ###	TestAll Geo	120 ppm	Pav 10 B 49-50	-8mm		14,6	56,9	55,31	15,7	<LOD	18396,57	<LOD		501435,22
22 ###	TestAll Geo	120 ppm	Pav 10 B 68-69	-8mm		19,03	36,98	27,42	9,44	<LOD	45967,11	<LOD		501489,53

Annexe 11 : Tableaux de la perte au feu

11.a : tableau des résultats après étuvages

Côte sédiment	Présence de LED	Pcreuset	Pcreuset+éch
3-4cm	NON	32,703	48,585
6-7cm	NON	33,871	51,117
09-10cm	NON	33,889	51,616
13-14cm	OUI	31,751	52,511
16-17cm	OUI	30,593	49,173
19-20cm	OUI	33,093	50,233
28-29cm	NON	32,643	49,11
49-50cm	NON	33,934	50,336
68-69cm	NON	30,036	47,641

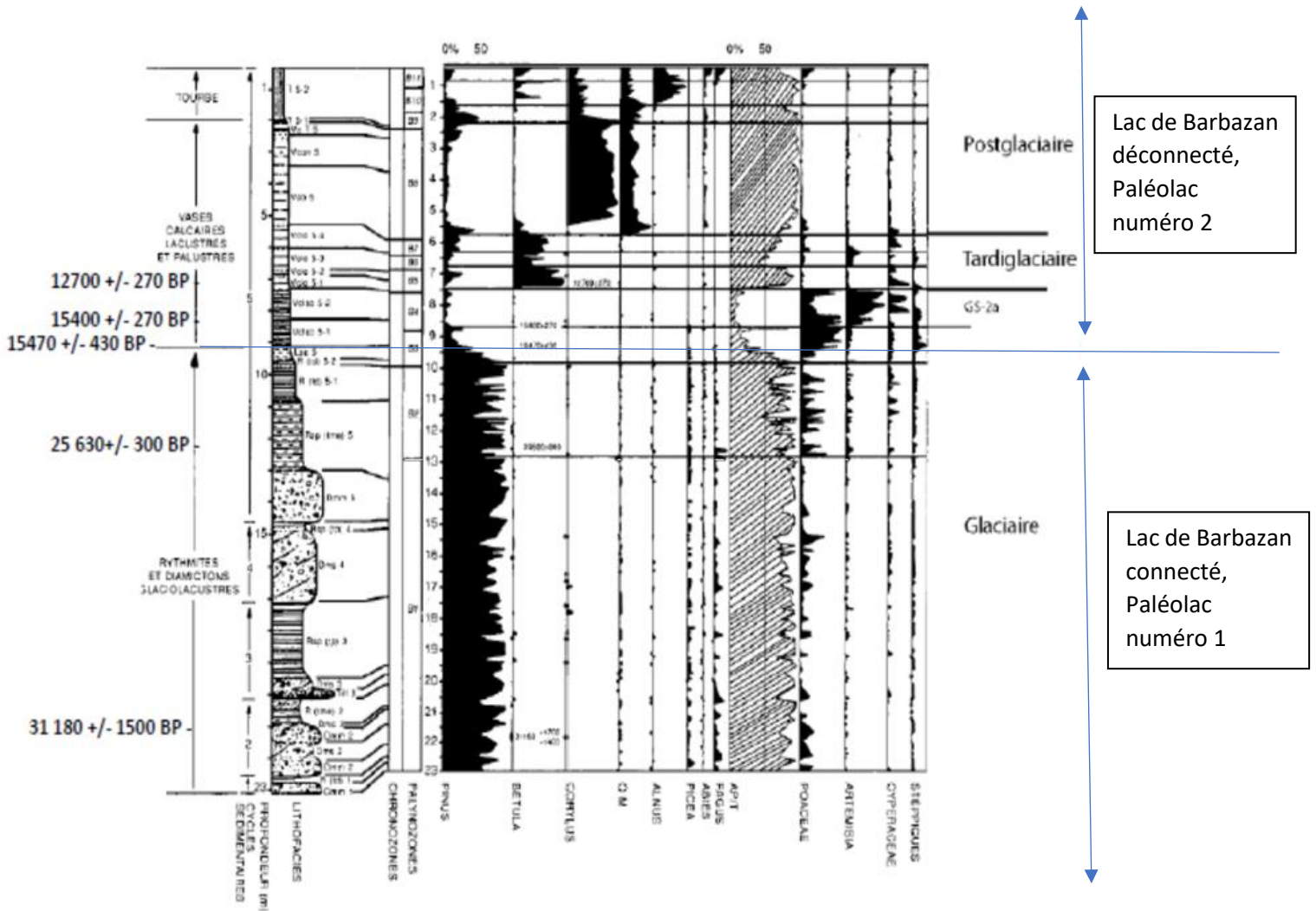
11.b tableau des résultats de la perte au feu

Côte sédiment	Présence de LED	Pcreuset2	Pcreuset+éch2	Creuset avec sédimet après perte au feu
3-4cm	NON	36,912	38,476	38,144
6-7cm	NON	33,285	34,936	34,656
09-10cm	NON	29,718	31,725	31,429
13-14cm	OUI	38,753	41,331	41,002
16-17cm	OUI	35,297	37,764	37,429
19-20cm	OUI	34,612	36,419	36,131
28-29cm	NON	34,033	35,404	35,146
49-50cm	NON	38,741	39,74	39,557
68-69cm	NON	34,199	35,474	35,219

11.c tableau des calculs suite à la perte au feu

Côte sédiment	Présence de LED	Teneur en eau en %	Teneur en carbone organique	Teneur en carbone organique en %	Teneur en cendre en %
3-4cm	NON	35,92491047	90,40573164	45,20286582	54,79713418
6-7cm	NON	36,63993585	89,99781134	44,99890567	55,00109433
09-10cm	NON	36,05714738	87,49177571	43,74588786	56,25411214
13-14cm	OUI	43,24176873	85,81251577	42,90625789	57,09374211
16-17cm	OUI	41,15164911	85,12834821	42,56417411	57,43582589
19-20cm	OUI	36,39523202	88,66756192	44,33378096	55,66621904
28-29cm	NON	38,73273256	91,88243017	45,94121508	54,05878492
49-50cm	NON	38,55597457	94,1743414	47,0871707	52,9128293
68-69cm	NON	46,46151008	93,25084364	46,62542182	53,37457818

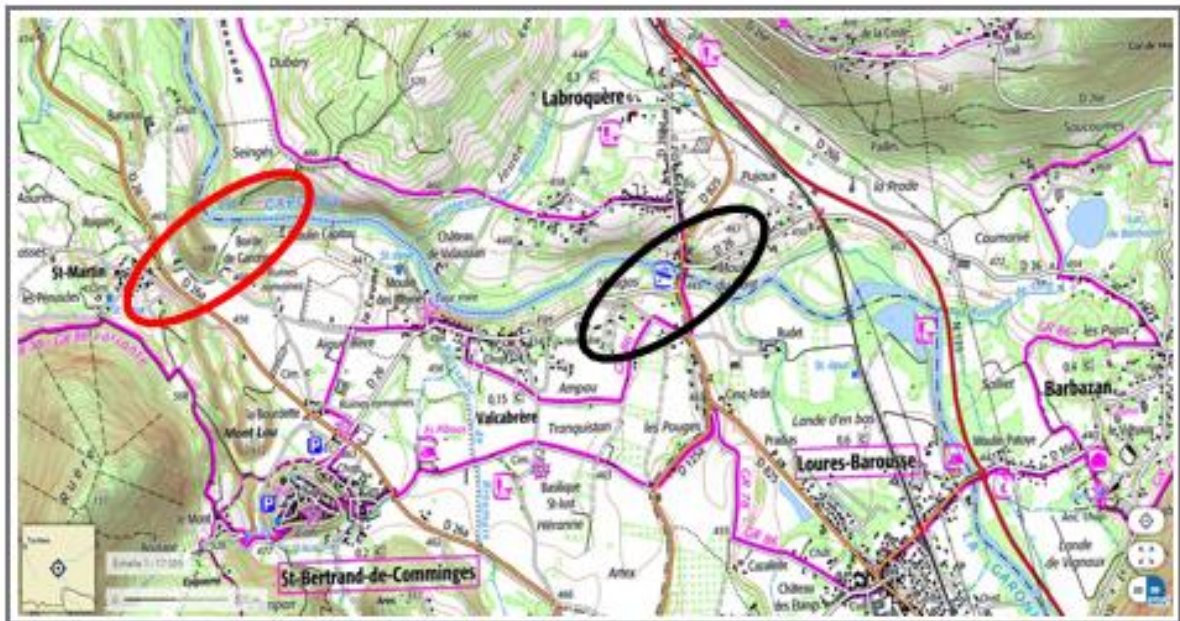
Annexe 12 : La séquence glaciolacustre du lac de Barbazan (450 mètres d'altitude), Andrieu, Jalut et al, 1988





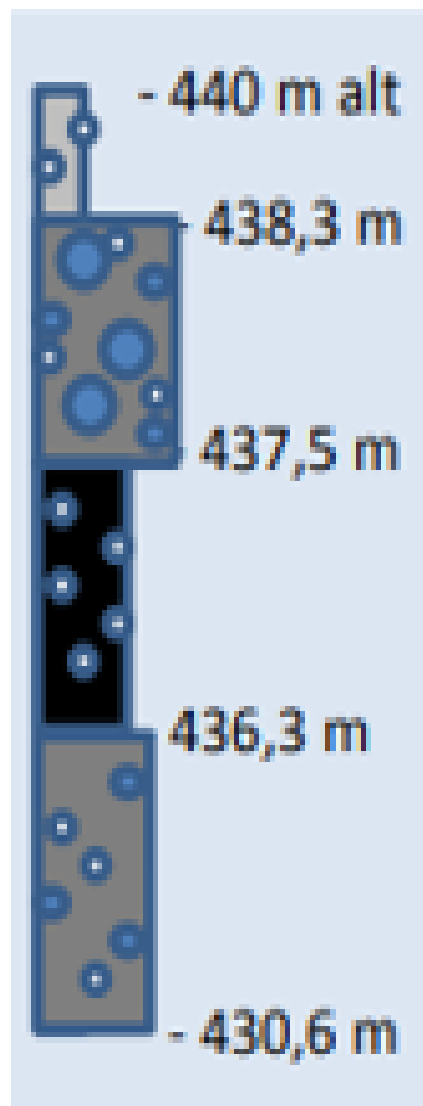
Annexe 13 : Capture Géoportail, IGN, 2019, montrant la moraine composant la limite du paléolac de la Garonne avant et après 15470 +/- 430 BP

La zone rouge correspond à la moraine du paléolac avec 15470 +/- 430 BP et la noire à la moraine limitant le paléolac après 15470 +/- 430 BP.



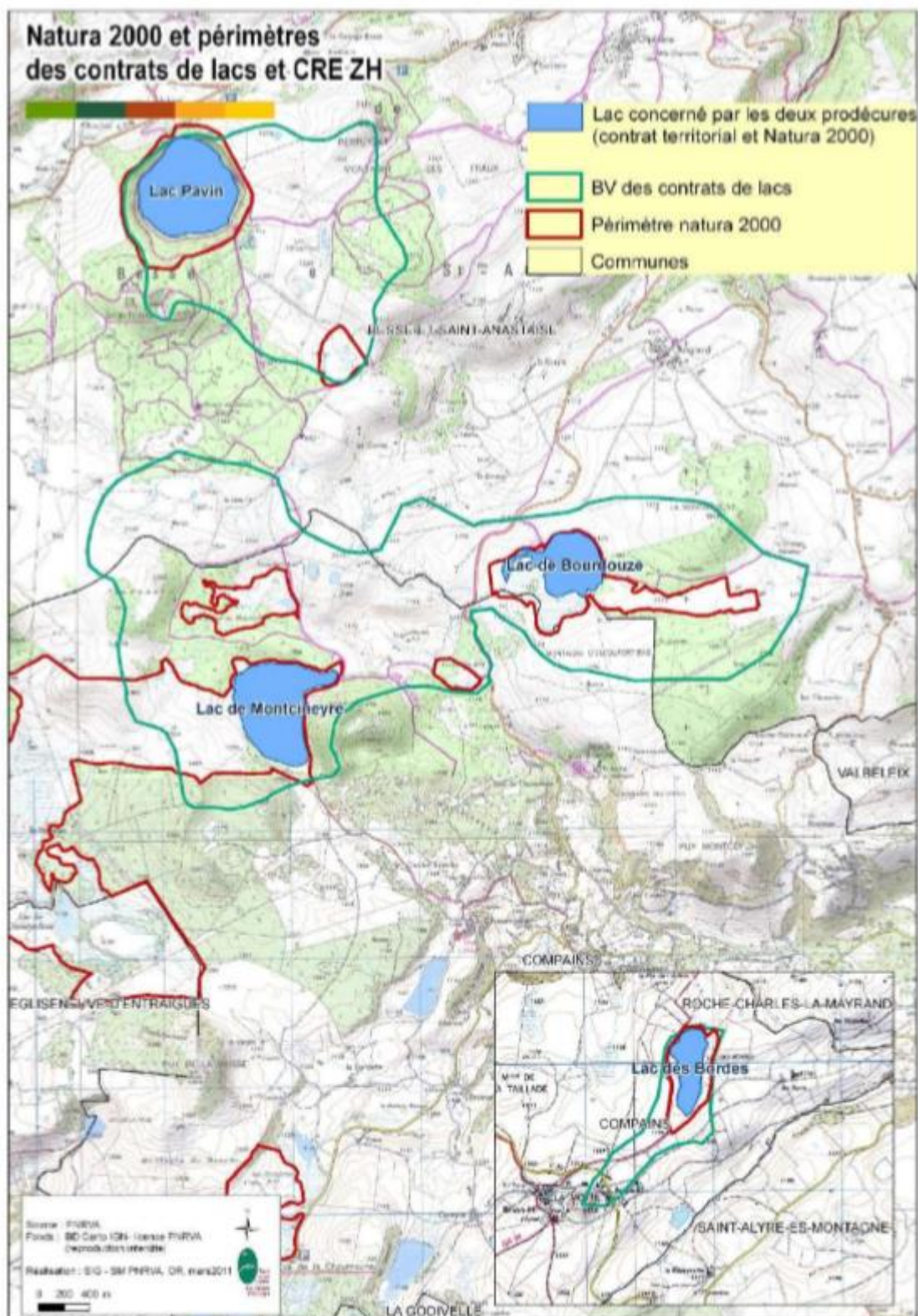


Annexe 14 : La séquence sédimentaire du forage industriel de Loures-Barousse.



Profondeur	Lithologie
0 à 1,7m	Alluvion sable fin argileux
1,7 à 2,5m	Alluvion mélange sable gravier et galets
2,5 à 3,7m	Alluvion sable gris noir
3,7 à 9,4m	Alluvion sable gris noir à gravier

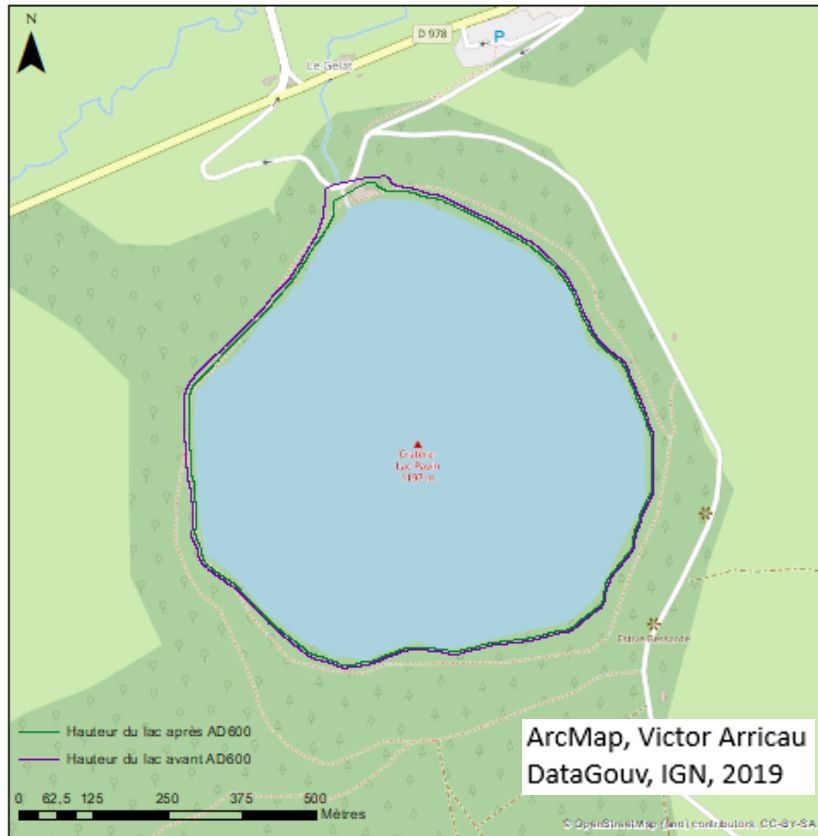
Annexe 15 : Carte des bassins versants sous contrat, Contrat territorial de la Couze Pavin de 2017 établi par le parc naturel régional des volcans d'Auvergne.



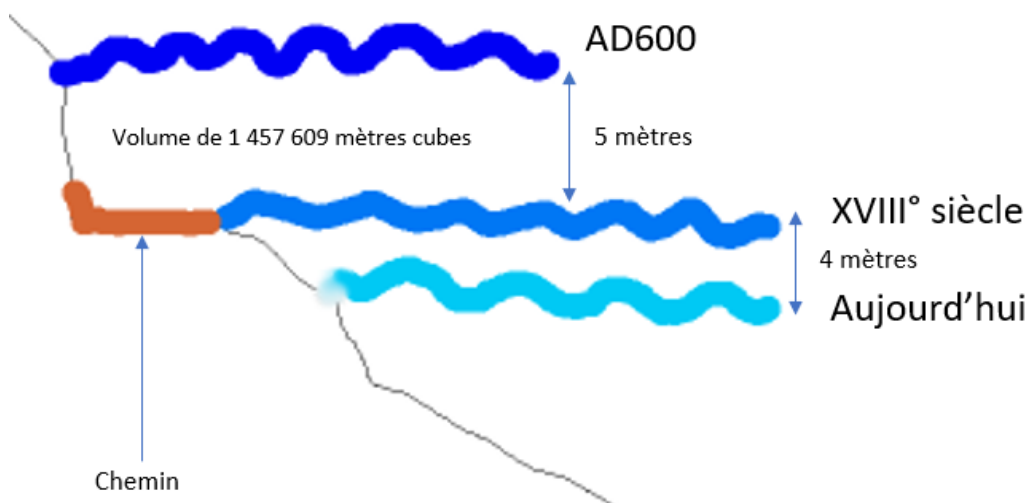
Annexe 16

Annexe 16.a

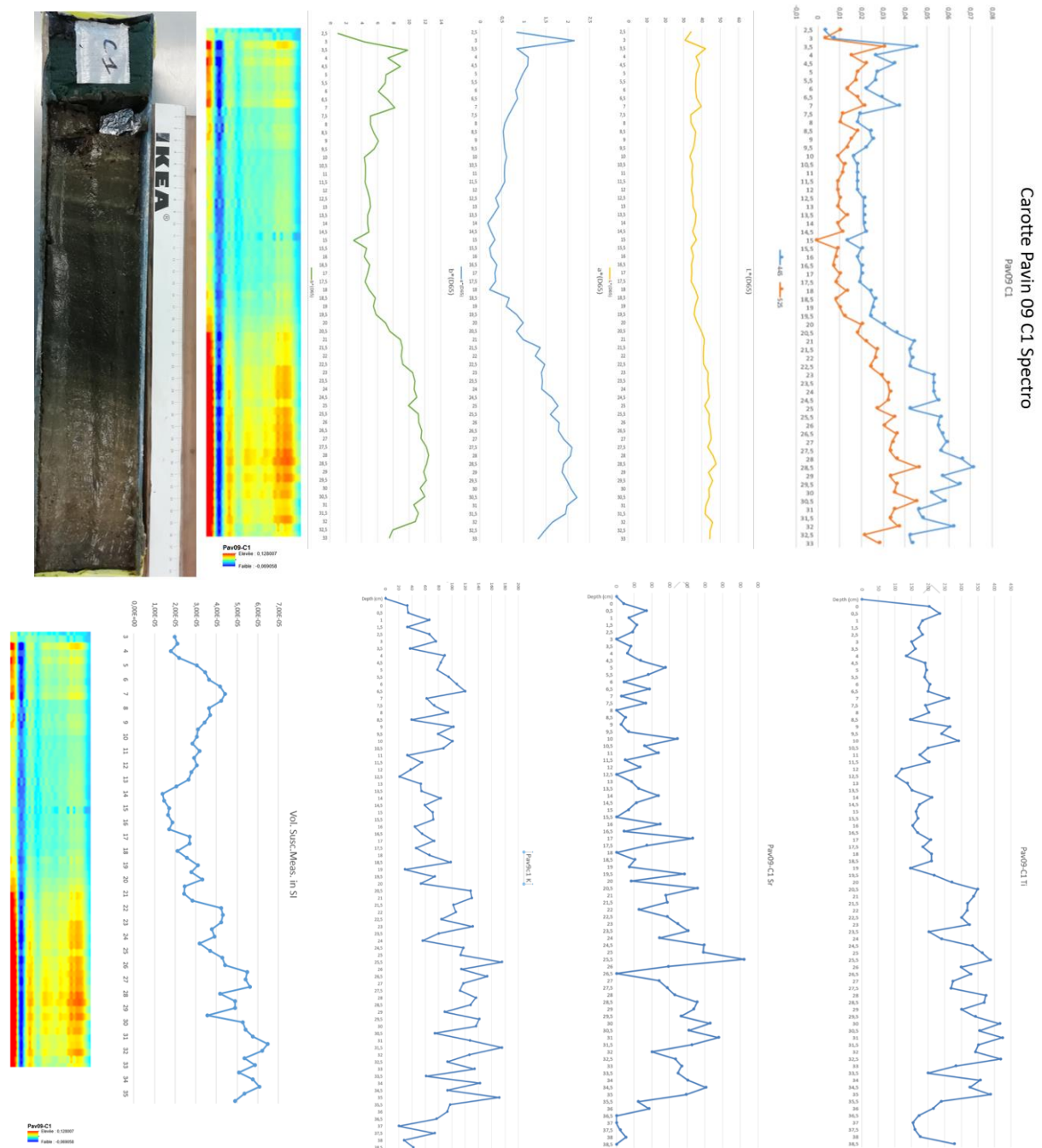
Carte du lac Pavin avec les différents niveaux de lac



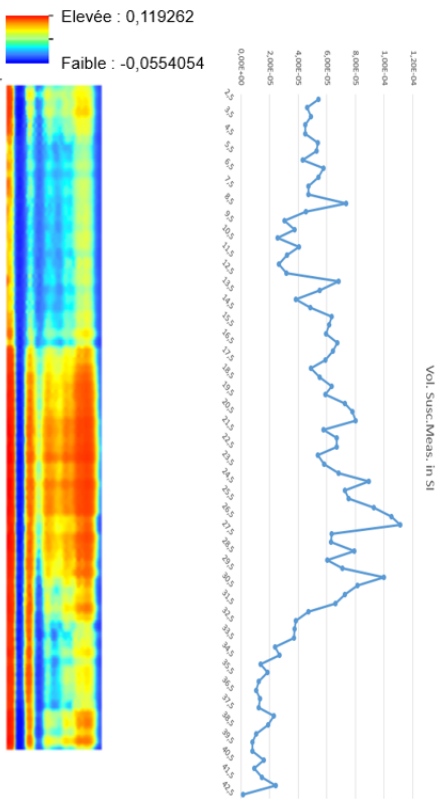
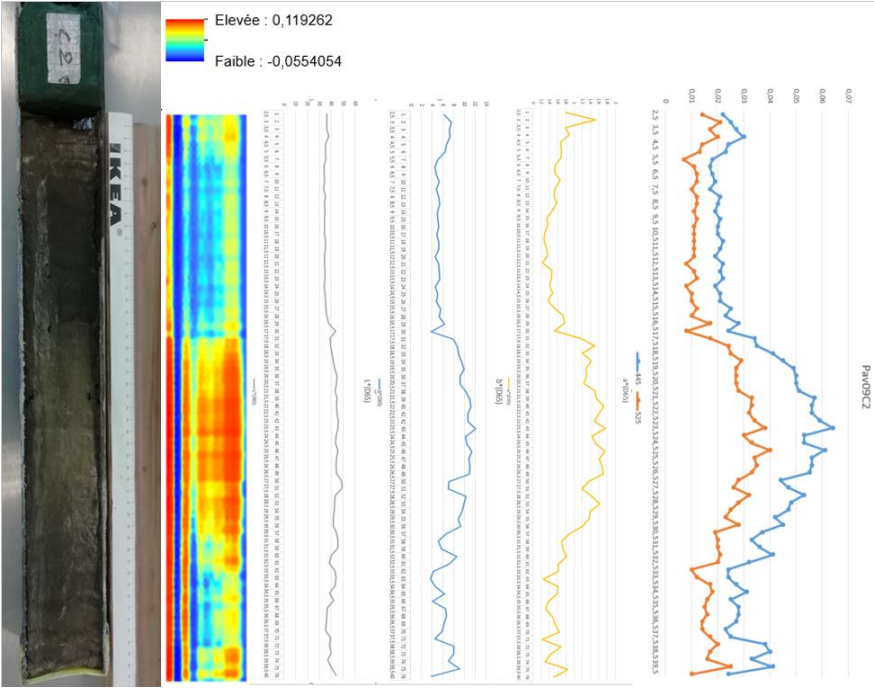
Annexe 16.b : Schéma de la variation du niveau du lac par rapport au chemin



# Annexe 17 : Spectrographie, dérivé des longueurs d'onde 445nm et 525nm et données de l'XRF



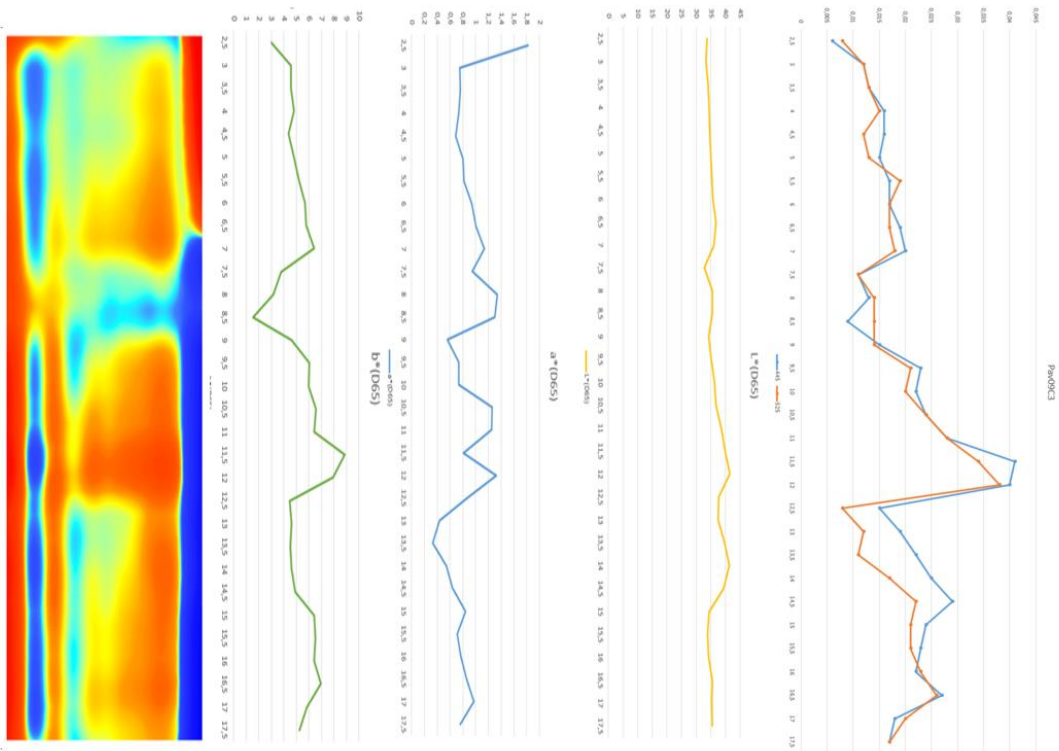
Carotte Pavin 09 C2 Spectro



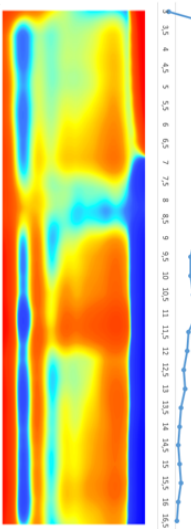
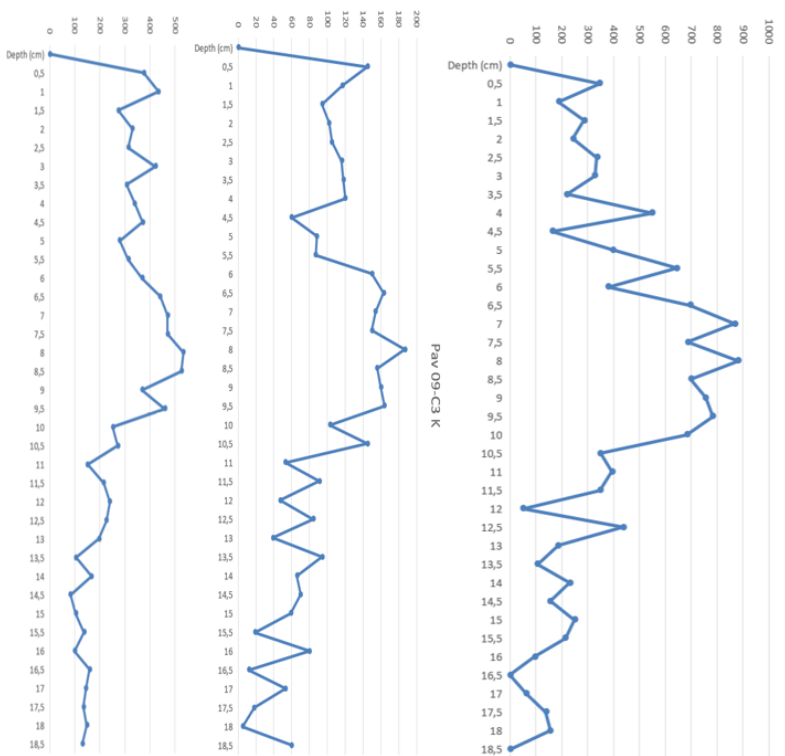
Pas de données XRF

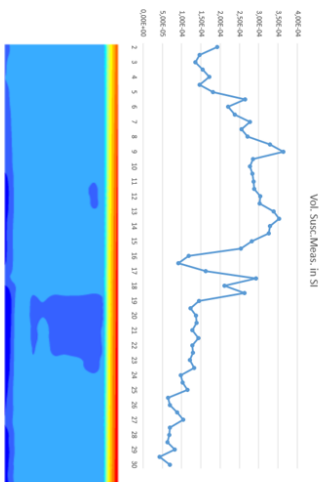
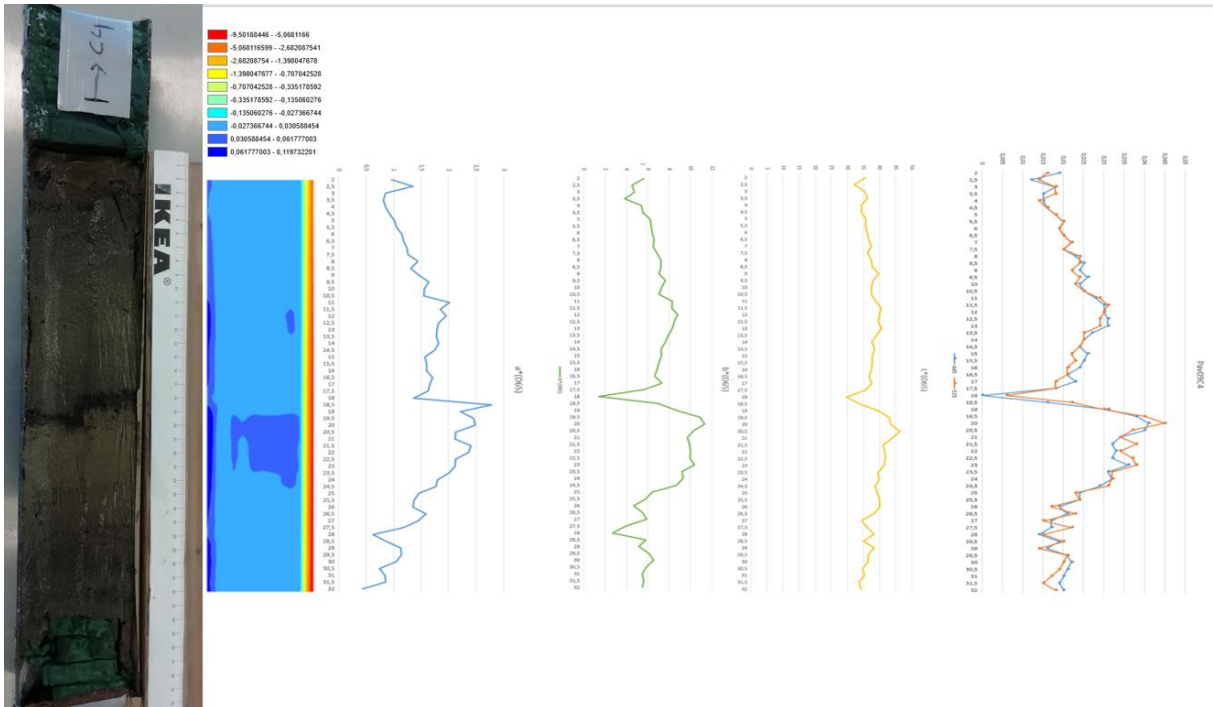


### Carotte Pavin 09 C3 Spectro



### PAV 09-C3 Sr



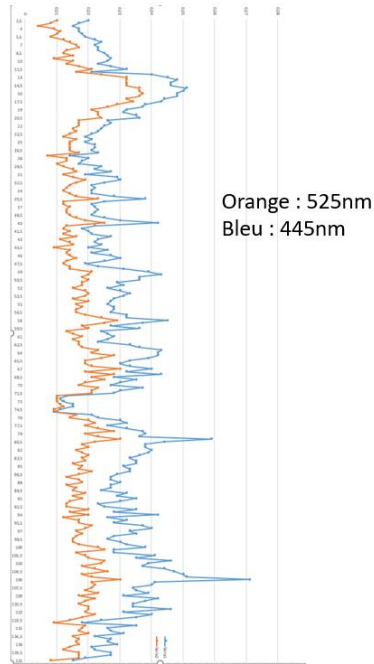
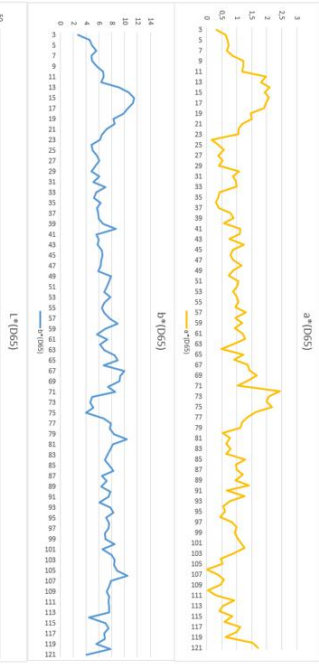
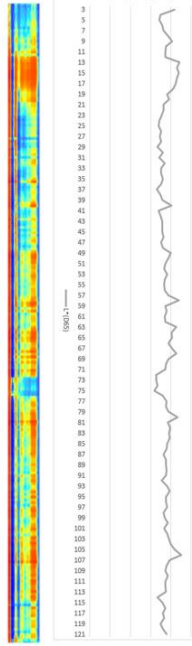


On pense que cette carotte est en limite de zone au vu des résultats, entre autre la susceptibilité magnétique, qui est moins prononcée.

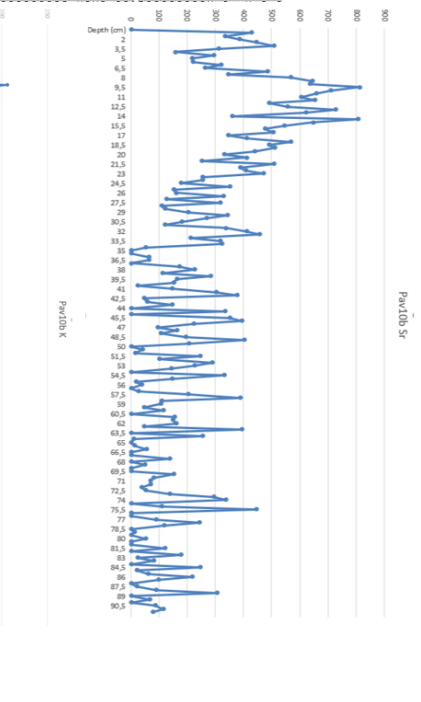
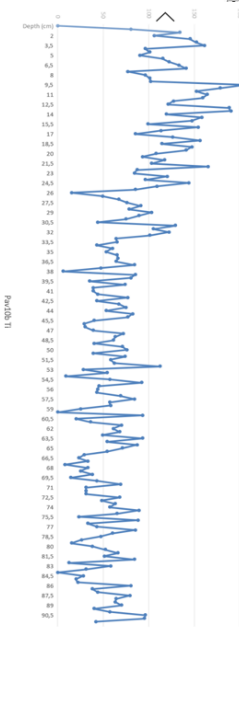
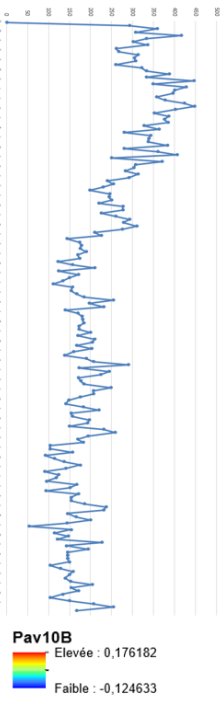
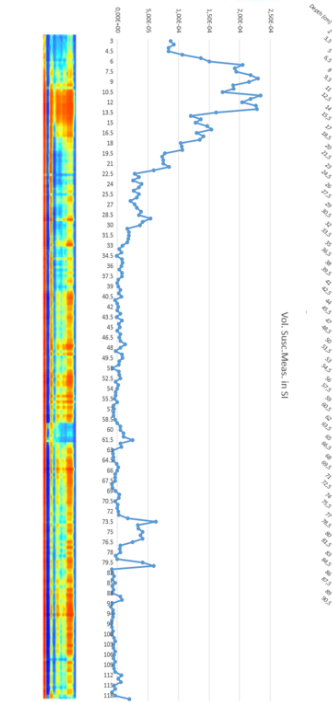


Zoom  
Pav10B

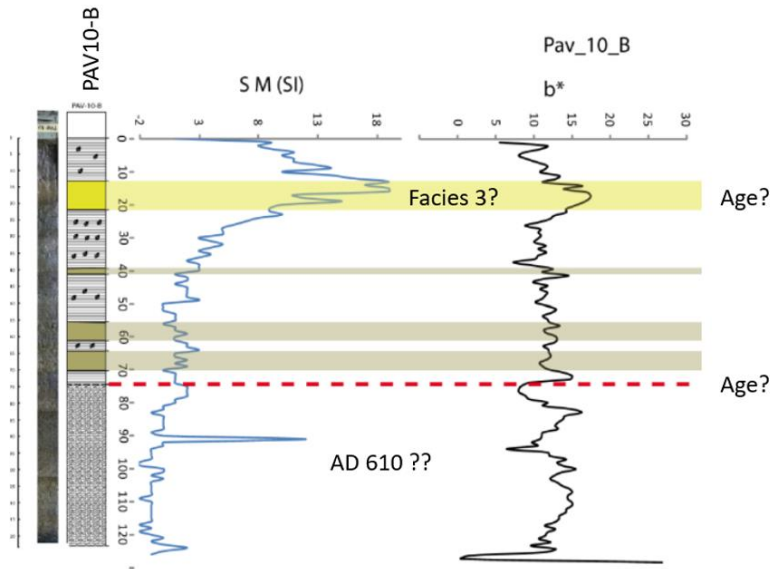
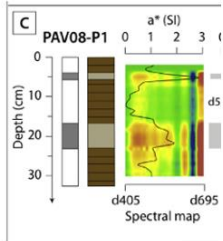
Pav10B  
Elevée : 0,176182  
Faible : -0,124633



Orange : 525nm  
Bleu : 445nm



Pav10B  
Elevée : 0,176182  
Faible : -0,124633



Annexe 18 : Profil sismique du lac Pavin, illustrant le glissement induit par la chute du lac en AD 600 et la loupe de glissement d'un second glissement en AD1300 en bordure du plateau subaquatique. Chapron et al., 2012

