



UNIVERSITÉ TOULOUSE
Jean Jaurès

GEODE
GÉOGRAPHIE DE L'ENVIRONNEMENT

GeP
MASTER GÉOGRAPHIE
DE L'ENVIRONNEMENT ET DU PAYSAGE



MASTER 2

Mention : Géographie et Aménagement

Spécialité : Géographie des changements environnementaux et paysagers

Rapport de stage

Géohistoire des risques naturels de trois lacs de cratère emblématiques du
Massif Central français (lacs Pavin, Tazenat et Issarlès).

ARRICAU Victor



Sous la direction de :

Soutenu le 30 Juin 2020

Maître de stage : Emmanuel Chapron

Enseignant-tuteur : Emmanuel Chapron

Résumé

Les études des lacs volcaniques d'Auvergne d'Issarlès, du Pavin et de Tazenat se basent à la fois sur une étude topobathymétrique fine ainsi que sur l'analyse de profils sismique. La combinaison de ces données nous permet de comprendre des moments clé dans la l'histoire de chacun de ces lacs.

Pour le lac d'Issarlès l'étude des sources relatives aux travaux des barrage EDF de la région ainsi que l'emploi de MNT 1 mètres ont permis de mettre en lumière les différents bassins versant qu'a connu le lac suite à ces travaux. Aujourd'hui le lac d'Issarlès a un bassin versant anthropique 65 fois plus important que son bassin versant naturel. Il a aussi été question de position des sites de carottage pour la campagne d'Octobre (carotte de 10 mètres) qui permettront d'étudier les dépôts de glissements de masse profond.

Pour le lac Pavin l'étude des variations de côte du lac afin de comprendre l'histoire de ce dernier. Cette étude se base sur l'analyse géomorphologique du Lidar ainsi que de la bathymétrie multifaisceau faite en 2008. Cette étude révèle trois potentielles beines littorales. Le premier niveau serait à 1214 mètres (soit 17 mètres au-dessus du niveau actuel) pendant l'Âge du Bronze, le second niveau entre l'Âge du Bronze et AD600 à 1206 mètres (soit 9 mètres au-dessus du niveau actuel), puis le troisième niveau à 1201,8 entre AD600 et AD1300 (soit 4,8 mètres au-dessus du niveau actuel). Le niveau du Pavin se serait ensuite stabilisé depuis AD1300.

Pour le lac de Tazenat l'étude du Lidar permet aussi de repérer plusieurs paléobeines. Ici les beines sont moins franches que pour le lac Pavin mais elles peuvent se regrouper en quatre phase de vidange du lac : I – 649 mètres (+19 mètres), II – 647-645 mètres (+17/15 mètres), III – 640-638 mètres (+10/8 mètres) et IV – 635-633 mètres (+5/3 mètres). Contrairement au lac Pavin nous n'avons pas d'idée de leur date.

Pour tous ces lacs il a aussi été demandé de faire une carte de navigation en vue de futures campagnes de terrain avec, entre autres, le capteur HydroSurveyor afin de densifier les données bathymétries de ces trois lacs auvergnats.

Mots clés :

SIG, Issarlès, Pavin, Tazenat, Lac volcanique, Sédimentation, lac de barrage, Variation niveau de lac, Eruption Limnique, Paléolac, Géohistoire, Paléobeine.

Abstract

The studies of the volcanic lakes of Auvergne d'Issarlès, Pavin and Tazenat are based on a fine topobathymetric study as well as on the analysis of seismic profiles. The combination of these data allows us to understand key moments in the history of each of these lakes.

For the lake of Issarlès the study of the sources related to the work of the EDF dams of the region as well as the employment of MNT 1 meters have allowed us to understand the various catchment areas. Today the anthropic catchment areas of Issarlès Lake is 65 times larger than its natural one. Also, I defined the position of the core sites for the October campaign (10 metre core) that will allow for the study of mass wasting deposit.

For Lake Pavin, the study of the variations of the lake's coastline in order to understand the history of the lake. This study is based on the geomorphological analysis of the Lidar and the multibeam bathymetry made in 2008. This study reveals three potential paleo-shoreline. The first one is at 1214 meters (17 meters above current level) during the Bronze Age, the second level was between the Bronze Age and AD600 at 1206 meters (9 meters above current level), then comes the last level at 1201.8 between AD600 and AD1300 (4.8 meters above the current level). The level of the Pavin would then have stabilized since AD1300.

For Lake Tazenat there are several paleo-shoreline also visible thanks to the study of the Lidar. Here the paleo-shoreline are less frank than for Lake Pavin but they can regroup in four phase of emptying of the lake: I – 649 meters (+19 meters), II – 647-645 meters (+17/15 meters), III – 640-638 meters (+10/8 meters) and IV – 635-633 meters (+5/3 meters). Unlike Lake Pavin, we have no idea of their date.

For all these lakes it was also asked to make a navigation map in view of future field campaigns with, among others, the Hydrosurveyor sensor in order to densify the bathymetric data of these three Auvergne lakes.

Keywords:

GIS, Issarlès, Pavin, Tazenat, Volcanic lake, Sedimentation, dam lake, Lake level variation, Limnic eruption, Paleolake, Geohistory, Paleo-shoreline

Remerciement

A l'issue de ce stage je tiens à remercier très chaleureusement l'association des amis du Mézenc pour m'avoir permis de travailler sur ces trois lacs passionnants ainsi que pour leur financement qui a rendu ce stage possible.

Emmanuel Chapron pour son encadrement, sa disponibilité et son implication tant lors du stage que lors de la rédaction de ce mémoire qui m'a permis d'élargir ma vision tant sur le métier de chercheur que sur l'objet des lacs volcaniques.

Je veux aussi remercier chaleureusement Éric Maire et Léo Chassiot pour leur aide avec le traitement des données ainsi qu'Emmanuelle Defive et Jean-Paul Raynal pour leur aide dans la compréhension de ces systèmes lacustres.

Enfin, je tiens à remercier Solenne Lutrand pour ses (très) nombreuses relectures et conseils lors de la rédaction de ce rapport de stage.

Table des matières

Table des figures	7
1 - Introduction.....	11
1.1 Cadre du stage	11
1.1.1 Laboratoire GEODE	11
1.1.2 Association Les Amis du Mézenc.....	11
1.2 Contexte géographique global	12
1.2.1 Présentation du Massif Central Français.....	14
1.2.2 Des lacs emblématiques du Massif Central Français.....	15
1.3 Définition.....	21
1.4 Problématique.....	26
2 – Sites, Matériels et Méthodes	28
2.1 <i>Le lac d’Issarlès</i>	28
2.1.1 Sites d’Issarlès	28
2.1.2 Acquisition de profil sismique par « chirp ».....	30
2.1.3 Intégration des données topographiques et bathymétriques pour utiliser les données anciennes sur SIG.	33
2.2 Le lac Pavin	37
2.2.1 Le site du lac Pavin	37
2.2.2 Matériel et méthodologie	40
2.3 Le gour de Tazenat	44
2.3.1 Site du gour de Tazenat	44
2.3.2 Matériels et méthodes	47
3 – Résultats	49
3.1 Lecture des cartes des pentes.....	49
3.1.1 Lac Pavin	49
3.1.2 Gour de Tazenat.....	51
3.2 Bassin versant	53
3.2.1 Bassin versant d’Issarlès	53
3.2.2 Bassin versant du lac Pavin.....	56
3.2.3 Bassin versant du gour de Tazenat.....	58
3.3 Carte de navigation et présentation de potentiels déroulés de missions de terrain.....	59
3.4 L’étude des paléobeines lacustres comme marqueur des changements de niveau de lac : l’exemple des maars de Pavin et de Tazenat	63
3.4.1 Les paléobeines du gour de Tazenat	63

3.4.2 Les paléobeines du lac Pavin	69
4 - Discussion	76
4.1 Maar d'Issarlès	76
4.2 Gour de Tazenat.....	77
4.3 Lac Pavin	78
4.4 Définition d'une beine	80
Conclusion.....	82
Bibliographie.....	84
Annexes	89

Table des figures

- Figure 1 : a) Cartons de localisation des principaux maars européens méromictiques, b) carte des différents secteurs volcaniques en Auvergne, d'après Meybeck, (2016) localisant les lacs Pavin et Tazenat. Le lac d'Issarlès se trouve lui plus au Sud dans le Velay. 13
- Figure 2 : Carte de localisation générale de la zone et des sites étudiés qui se trouvent dans le Massif Central français. 15
- Figure 3 : Schéma synthétisant les spécificités du lac Pavin. 18
- Figure 4 : Carte de localisation générale des alentours du lac d'Issarlès avec les lacs maars du Bouchet et de Saint-Front ainsi que les barrages hydroélectriques géré par EDF et celui de Naussac utilisé pour l'irrigation. 20
- Figure 5 : Rephotographie effectuée au Gour de Tazenat montrant l'impact paysagé du bloom de cyanobactérie ainsi que les principaux éléments d'un maar. 23
- Figure 6 : Schéma d'érosion et de sédimentation d'une beine de maar. 24
- Figure 7 : Image du lac Dagze Co prise par le capteur ASTER du satellite Terra le 8 octobre 2001 montrant un delta lacustre, un paléodelta immergé et des paléolittoraux émergés. 25
- Figure 8 : d'après Anzidei et al., 2010 : a) Image de la bathymétrie multifaisceaux du lac d'Albano montrant les beines submergées (CL1 à CL4) localisées entre 21 et 41 mètres de fond. 26
- Figure 9 : Cartes bathymétriques de 1898 de Delebecque. 27
- Figure 10 : Carte topographique 1 mètre des alentours du lac d'Issarlès avec les installations EDF. 29
- Figure 11 : Photographie aérienne du lac d'Issarlès avec les aménagements EDF. La grille sismique réalisée en 2019 dans le lac et la localisation de la figure 13 est aussi indiqué par les tracés en bleu. 30
- Figure 12 : a) Sondeur Belloc utilisé par Delebecque lors de ses bathymétries qui permettait de prendre la profondeur en un point ; b) Matériel utilisé lors de la bathymétrie par « chirp » avec un émetteur-récepteur relié à un boîtier d'acquisition, un GPS et un ordinateur ; c) Schéma montrant la mesure en un point de Delebecque qui consiste à faire couler un poids et regarder à quelle profondeur il heurte de fond du lac ; d) Principe de la cartographie sismique réflexion de type « chirp », Chapron et al, 2007. 32

Figure 13 : Profil sismique du maar d'Issarlès montrant les différents remaniements du matériel sédimentaire (MWD) avec leur tubidites distales (T) et deux traces de réflecteurs plus forts (Ra et Rb) ; a) fenêtre du logiciel Seisee et b) fenêtre du logiciel EDIFISegy. L'échelle verticale est donnée en temps (milliseconde temps double). 32

Figure 14 : a) Bloc 3D du bassin versant du lac d'Issarlès montrant les cours d'eau de la Loire et de la Veyradeyre, le barrage de la Veyradeyre et le volcan de la Cherchemuse ; b) Carte des pentes du bassin versant du lac d'Issarlès. 36

Figure 15 : Carte topobathymétrique des environs du lac Pavin. LP : Lac Pavin ; VMC : Volcan Montchal ; CP : Couze Pavin et PP : Puy du Pertuyzat. 37

Figure 16 : Carte topobathymétrique du Lidar de Pavin. LP : Lac Pavin ; VMC : Volcan Montchal ; CP : Couze Pavin et PP : Puy du Pertuyzat ainsi que le bloc 3D associé. 38

Figure 17 : Carte bathymétrique multifaisceaux du lac Pavin avec les carottes réalisées, les profils sismiques ainsi que les singularités subaquatiques du lac : les sources et l'exutoire subaérien, le slump AD 600 (trait noir) et a loupe de glissement d'AD 1300, d'après Chassiot et al., 2016. 39

Figure 18 : Illustration des bathymétries multifaisceaux disponibles sur des lacs naturels profonds « français » avec le Léman (a et d), le Bourget (b et c) et le Pavin (e). 40

Figure 19 : a) Schéma d'une campagne de bathymétrie multifaisceaux (d'après le site IFREMER) ; b) Photographie du capteur Hydrosurveyor cinq faisceaux 1- Capteur Hydrosurveyor, 2- Emetteur/récepteur. 41

Figure 20 : Carte IGN des alentours du gour de Tazenat et localisation de la zone couverte avec un LIDAR illustré dans la Figure 21. 44

Figure 21 : Illustration des données Lidar de la zone du gour de Tazenat et modèle 3D du secteur. 45

Figure 22 : Profil du vallon de Rohegude et du Gour de Tazenat selon Juvigné et Stach-Czerniak, et al. 1998. 46

Figure 23 : Photographie aérienne du gour de Tazenat avec l'emplacement du delta, de l'exutoire incisé de 12 mètres, du ruisseau de Rohegude, des profils sismique (trait cyan) et des carottes sédimentaires collectées en 2017. 47

Figure 24 : Profil sismique du gour de Tazenat montrant les différents remaniements du matériel sédimentaire (MWD) ainsi que l'emplacement et la profondeur de la carotte prélevée : TA-17-01. Au-delà de 3 m de profondeur, la teneur en gaz des sédiments lacustres (CRS) et/ou la présence de sédiments plus grossiers (CGS) absorbe le signal acoustique. 48

Figure 25 : Carte des pentes en degrés obtenue à partir du Lidar du lac Pavin avec en noir le niveau 0 du lac à 1197 mètres d'altitude.	49
Figure 26 Illustration des éléments géomorphologiques du Gour du Tazenat.	51
Figure 27 : Limites du bassin versant topographique naturel du lac d'Issarlès.	53
Figure 28 : Evolution des limites des bassins versants anthropisés du lac d'Issarlès c entre 1954 (au Nord-Est du lac) et 1967 (au Sud-Est du lac).	54
Figure 29 : Limites du bassin versant du lac d'Issarlès depuis 1967.	55
Figure 30 : Illustration des différents réseaux hydrographiques aux alentours du lac Pavin(a) et de la carte des pentes qui jouxtent le lac (b), d'après Arricau (2019).	57
Figure 31 : Carte du Bassin versant topographique et hydrologique du lac Pavin.	58
Figure 32 : Bassin versant topographique du lac d'Issarlès.	59
Figure 33 : Carte de navigation du lac Tazenat avec en blanc les profils sismiques et la bathymétrie.	60
Figure 34 : Carte de navigation du lac Pavin avec en blanc les profils sismiques réalisé.	61
Figure 35 : Carte de navigation du lac d'Issarlès (a) avec en blanc les profils sismiques et la bathymétrie, les points bleus sont les futurs points de carottages et enfin les points rouges correspondent aux points de géoréférencement. (b) : Tableau contenant les coordonnées des points de carottage retenues.	62
Figure 36 : Signatures géomorphologiques de paléo beines sur le Gour du Tazenat. (a) Carte des pentes du delta de Tazenat avec les coupes altimétriques ; b) Coupe altimétrique du Rochegude ; c) Coupe altimétrique transversale au delta ; d) Coupes altimétriques du tributaire 1 : Première terrasse à 649 mètres soit environ 19 mètres plus élevée que le fond de l'exutoire, 2 : Seconde terrasse à 640-638 mètres soit entre 7 et 5 mètres plus élevé que le fond de l'exutoire, 3 : Fond de l'exutoire 633 mètres	65
Figure 37 : Analyse géomorphologique du cratère du Gour de Tazenat (a) : Carte des pentes avec en noir le niveau 0 du lac, la localisation en vert de la courbe des pentes (Annexe 11), de l'isoligne 644 mètres, emplacement du chemin et en noir l'emplacement des coupes topographiques b).: Courbes altimétriques de la zone étudiée (phase I) : Sommet plat du cratère,	

(phase II) : Zone de replat à 644-645 mètres, soit 12 mètres au-dessus du niveau du actuel du Gour de Tazenat ; chemin, potentielle paléobeine (phase IV) : paléobeine. 67

Figure 38 : Analyse géomorphologique du cratère du Tazenat (a) : Carte des pentes avec en noir le niveau 0 du lac et l'emplacement des coupes topographiques (b) : Courbes altimétriques de la zone étudiée **II** : Zone de replat à 644 mètres **III** : replat à 637 mètres, **IV** : Replat à 632 mètres. 68

Figure 39 : Profil sismique du lac de Tazenat montrant des dépôts de glissement de masse avec des turbidites se rejoignant de part et d'autre du lac. 69

Figure 40 : Analyse géomorphologique de la partie NW du cratère du Pavin a : Carte des pentes en degrés du cratère du Pavin avec en noir le niveau 0 du lac ainsi que les chemins IGN et les isolignes d'anciens niveaux lacustres ; b : Coupe altitudinales avec les trois paléo beines potentielles. 71

Figure 41 Analyse géomorphologique de la partie NE du cratère du Pavin (a) : Carte des pentes en degrés du cratère du Pavin avec en noir le niveau 0 du lac ainsi que les chemins IGN et les isolignes d'anciens niveaux lacustres ; b : Coupe altitudinales montrant la zone de paléobeine à 1214 mètres. 73

Figure 42 : Carte des pentes de l'exutoire de Pavin avec la présence de deux zones de replats correspondant probablement à des paléo exutoires. 74

Figure 43 : Principaux environnements sédimentaire du Pavin identifiés à partir des profils sismique 3,5 kHz et 12 kHz. Sur ce dernier on observe clairement là où il y a une différenciation entre le faciès littoral et le faciès diatomite. 75

Figure 44 : Schéma résumant les principales mécaniques du maar d'Issarlès. 76

Figure 45 : Schéma résumant les principales mécaniques du gour de Tazenat. 78

Figure 46 : Schéma résumant les principales mécaniques du lac Pavin. 80

Figure 47 : Schéma résumant les principales mécaniques d'une beine de maar. 81

1 - Introduction

1.1 Cadre du stage

Le stage devait initialement se passer dans les locaux du laboratoire GEODE à Toulouse mais en raison de la pandémie de COVID-19 le télétravail s'est imposé. Cette introduction présente dans un premier temps le laboratoire dans lequel le stage aurait dû avoir lieu, puis l'association qui a financé ce stage de trois mois : Les Amis du Mézenc.

1.1.1 Laboratoire GEODE

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.

1.1.2 Association Les Amis du Mézenc

L'association des amis du Mézenc (<http://www.lesamisdumezenc.fr/>) fût créée en 1987 et a pour but de mettre en valeur le patrimoine naturel et culturel de la région du Mézenc. Elle organise chaque année, seule ou en partenariat, des animations, des expositions, des conférences, des randonnées touchant l'ensemble des thèmes du patrimoine mézencole. Ces projets et actions de l'Association des Amis du Mézenc sont définis par le conseil d'administration et validés par une assemblée générale annuelle. L'association regroupe plus de 421 adhérents. Chaque année sont publiés *Les Cahiers du Mézenc* qui illustrent le projet d'action de l'association. Les Amis du Mézenc éditent quatre fois l'an une lettre interne, la *Lettre des Amis du Mézenc*, qui informe chacun sur les activités de l'association, résume l'actualité du patrimoine local, prolonge les débats et contribue à maintenir des liens au sein de la communauté et de la diaspora mézencoles. Afin de mener à bien ses objectifs l'association

travaille avec de nombreux partenaires locaux, tant des acteurs de la vie économique que de la vie scientifique : le groupe géologique de la Haute-Loire, le réseau de documentation du développement local du Massif du Mézenc et des sources de la Loire, l'association LIGER, l'AOP le Fin Gras du Mézenc, Archéo-Logis (avec Jean-Paul Raynal), le laboratoire GEOLAB (avec Emmanuelle Defive), l'Association pour la Préservation des Paysages Exceptionnels du Mézenc, Maison et Musées du massif Mézenc-Gerbier, l'association ARCens Amitié Développement (ARCADE), le Groupe de Recherche Archéologique Vellave (GRAV) et Mémoire d'Ardèche et Temps présent. Ce stage de 3 mois en télétravail a bénéficié du financement de gratification grâce à cette association. Ce travail donnera lieu en contrepartie d'un article grand public à paraître dans la revue en 2021 afin d'expliquer les avancées scientifiques sur l'étude des risques naturels liés aux lacs volcaniques de type maar et en particulier dans le secteur du lac d'Issarlès et du Géoparc des Monts du Forez.

1.2 Contexte géographique global

L'étude qui va être présentée se situe dans un contexte d'augmentation de la population humaine mondiale. Cela s'additionne aussi avec d'un côté une forte anthropisation des campagnes et des hydrosystèmes et de l'autre une prise de conscience du danger climatique et de la raréfaction future de la ressource d'eau douce avec des mesures de préservation de cette ressource et de la biodiversité. Aujourd'hui, ces lacs sont des ressources économiques pour le secteur de la Chaîne des Puys et du Velay avec le tourisme vert qui s'est mis en place autour de ces géosites. Ces lacs volcaniques sont peu nombreux en Europe et bénéficient donc d'une attention particulière pour leur étude et protection. Au sein de ces lacs on note en Allemagne, en Italie et en France des lacs rares dont une partie des eaux est anoxique : ce sont des lacs méromictiques (Figure 1a).

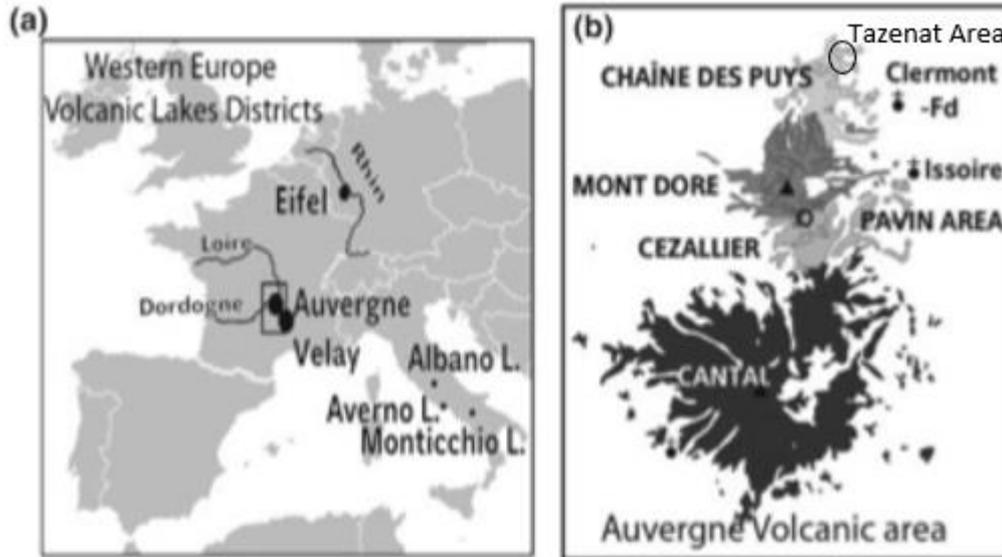


Figure 1 : a) Cartons de localisation des principaux maars européens méromictiques, b) carte des différents secteurs volcaniques en Auvergne, d'après Meybeck, (2016) localisant les lacs Pavin et Tazenat. Le lac d'Issarlès se trouve lui plus au Sud dans le Velay.

Les mesures de l'Etat sont nombreuses concernant la zone de la Chaîne des Puys (Figure 1 b et Figure 2) puisqu'elle est classée au patrimoine mondial de l'UNESCO, elle rentre dans la directive-Cadre sur l'Eau de l'Union Européenne ; au point de vu local il y a de nombreux projets de gestion territoriale tel de des PPRI sur les bassins versants pour protéger ces lacs. Enfin, d'un point de vu plus spécifique cet espace fait régulièrement l'objet d'appel à projet scientifique par le CNRS avec des programmes comme ceux de la Maison des Sciences de l'Homme (MSH Clermont-Ferrand) et de la Société. Cet intérêt scientifique pour ces lacs auvergnats est visible au travers des données que nous allons utiliser pour ce stage qui proviennent de différents programmes de recherche. En effet, les données utilisées durant ce stage proviennent de divers organismes : le Lidar du lac Pavin a été fait dans le cadre de l'Espace Naturel Sensible Pavin et Creux de Soucy (financé par le département du Puy de Dôme). Le Lidar de Tazenat a été collecté par le CRAIG dans le cadre du projet LIDARCHEO en 2017 et les données sédimentologiques ont été collectées en 2017 dans le cadre de collaboration entre GEODE et le laboratoire Ghéco de l'université de Tours. Ces données sont remobilisées dans le cadre du nouveau projet CNRS PALEOBLOOM piloté par Delphine Latour du LMGE UCA Clermont-Ferrand visant à étudier l'origine des pics de bloom de cyanobactéries récents dans le lac de Tazenat (programme AAP 2020 CNRS). Enfin les données sismiques d'Issarlès ont été collectées en collaboration entre GEODE et GEOLAB dans le cadre du projet DAM2 de la MSH Clermont-Ferrand (2019-2020).

1.2.1 Présentation du Massif Central Français

Le massif central est une zone de moyenne montagne regroupant d'anciens volcans. Au Nord la Chaîne des Puys culmine à 1465 mètres, cette zone fût formée entre 70 000 BP et 8550 +/- 400 cal BP. Cette partie Nord de la Chaîne des Puys comporte la faille active de la Limagne (Figure 2) expliquant la présence de traces d'importants séismes et/ou tremblement de terre. La seconde partie de la Chaîne des Puys, au Sud, culmine à 1886 mètres et fût formée pendant le Pléistocène et l'Holocène (Chapron et al., accepté). La Chaîne des Puys se compose donc pour ces raisons de nombreux petits lacs qu'ils se soient formés lors de la fonte des glaciers puisque les reliefs tel le Puy du Sancy étaient partiellement englacés et développaient plusieurs langues de glaces dans les vallées périphériques (Defive et al, 2019). Cette région a aussi été impactée par plusieurs éruptions volcaniques très violentes (de type phréatomagmatiques) ayant produit des lacs de cratères (de type maar) au cours du dernier cycle climatique du Quaternaire. Plus récemment l'édification de barrages (anthropiques ou naturels avec l'évolution des volcans ou le passage de coulées de lave) ont vu augmenter le nombre de plan d'eau en Auvergne (Chassiot (thèse), 2015 ; Chapron et al., accepté). Cependant l'humain n'a pas seulement modifié ce milieu par la construction de barrage. En effet, on retrouve des traces d'anthropisation de ce milieu dès la période du Néolithique avec la construction de monuments ou l'usage des sols (foret, pastoralisme) (Defive et al. 2018). Cette emprise de l'humain sur son milieu décline peu à peu à la fin du XIXème siècle avec l'exode rural. Aujourd'hui la région est économiquement polarisée par la ville de Clermont-Ferrand dans le bassin de la Limagne (Figure 2).

C'est donc dans ce contexte que nous allons étudier trois lacs emblématiques du Massif Central Français. Un lac peut être emblématique par la valeur que l'on porte à son paysage, pour son histoire, sa chimie et les phénomènes naturels qui gravitent autour ou encore pour sa valeur économique (aménité, tourisme, ...).

On peut par exemple parler du lac du Bouchet (Figure 2) aux sources de l'Allier qui est mondialement connu d'un point de vue scientifique puisque c'est un site de référence en Europe avec son enregistrement sédimentaire lacustre des derniers 140 000 ans du paléomagnétisme et des changements environnementaux (Thouveny et al, 1994 ; Debard et Pastre, 2008). Ce lac de maar proche d'Issarlès il n'a pas d'exutoire et est aujourd'hui un site protégé et ouvert au tourisme vert.

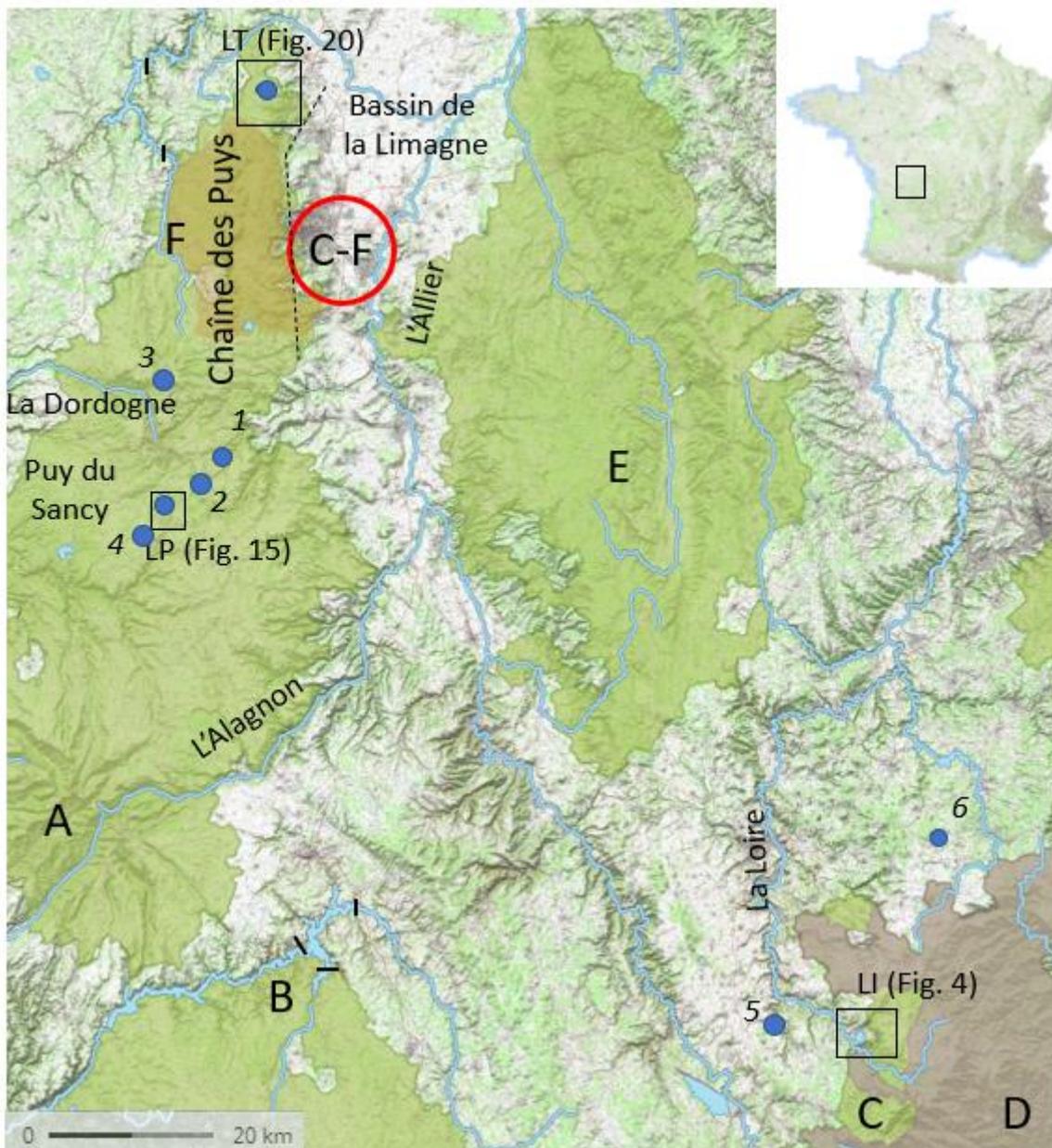


Figure 2 : Carte de localisation générale de la zone et des sites étudiés qui se trouvent dans le Massif Central français LT : Lac de Tazenat ; LP : Lac du Pavin ; LI : Lac d'Issarlès. La ville de Clermont-Ferrand (CF) est située dans le bassin de la Limagne à l'ouest de la Chaîne des Puys et de la faille de la Limagne (tiret noir). Les lacs naturels suivants vont être cités mais pas étudié directement : 1 – Lac d'Aydat, 2 – Lac Chambon, 3 – Lac de Guéry, 4 – Lac Chauvet, 5 – Lac du Bouchet, 6 – Lac de Saint-Front. Cette carte localise aussi les principaux barrages (trait noirs) construit par l'homme au XX^{ème} siècle. Cette région se caractérise aussi par plusieurs parcs : A – Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne, B – Parc Naturel Régional de l'Aubrac, C – Parc Naturel Régional des Monts d'Ardèche, D – Géoparc des Monts du Forez, E – Parc Naturel Régional du Livradois-Forez, F – Site UNESCO Haut lieu tectonique Chaîne des Puys - faille de Limagne et sa zone tampon. C'est donc dans ce contexte que nous allons étudier trois lacs emblématiques du Massif Central Français avec les lacs de Tazenat et de Pavin dans la Chaîne des Puys et Issarlès dans le Velay (Figure 1).

1.2.2 Des lacs emblématiques du Massif Central Français

1.2.2.a Le lac Pavin

Le lac Pavin est le plus jeune volcan de métropole, le seul lac méromictique français, le berceau de la limnologie française ainsi qu'un lac instrumenté (Observatoire des lacs alpin). Il

est situé à 1197 mètres d'altitude (ce qui en fait le lac volcanique le plus haut de France), au sein des montagnes d'Auvergne au Sud du Puy du Sancy 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 km² et une profondeur de 92 mètres. La formation du Pavin date d'environ 7000 ans cal. BP peu de temps après l'éruption du Montchal qui forma un cône de scories et plusieurs coulées de lave ayant été partiellement préservées par l'éruption du Pavin (Gourgaud et al. 2016). Cela en fait donc le lac le plus jeune de la Chaîne des Puys. D'un point de vue touristique le lac permet la promenade par la présence de chemins, la pêche et possède au sein de son exutoire fortement anthropisé un hôtel, un restaurant et un petit musée du lac géré par la commune de Besse-en-Chandesse. Son histoire, sa géologie, sa biogéochimie et sa sédimentologie sont étudiées depuis plusieurs siècles (Sime-Ngando et al, 2016). Initialement ce stage devait étudier comment les mythes, les données archives (Annexe 1), les sédiments et la géomorphologie peuvent aider à expliquer au grand public comment reconstituer l'histoire d'un lac de maar et les risques naturels que lui sont associés. D'un point de vue scientifique le lac fut le berceau de la limnologie française puisqu'il s'agit de l'unique lac méromictique français, c'est-à-dire que les eaux supérieures sont oxygénées contrairement aux eaux anoxiques inférieures. Ces eaux ne se mélangent jamais et sont séparées par une chemocline à 60 mètres de fond (Figure 3). Ce lac a aussi connu à minima une chute de son niveau depuis AD 600 (Chapron et al. 2010, Chassiot et al. 2016 et 2018) suite à des glissements de terrain provoqués par des tremblements de terre. Enfin en 1785 le lac aurait été impacté par une éruption limnique particulièrement bien documentée selon Meybeck (2019). Une éruption limnique est un type d'éruption volcanique caractérisée par le dégazage brutal des eaux profondes d'un lac méromictique qui relargue les gaz volcaniques (CO₂, CH₄) émis en continu par un volcan et accumulés durant des années dans les couches profondes du lac. Ces éruptions limniques sont rares, très dangereuses et peu documentées, la plus étudiée est celle du lac Nyos (au Cameroun) ayant eu lieu en août 1986 et ayant tué 1746 personnes en une nuit (Tchindjang, 2018). Une éruption limnique se caractérise aussi par un « rollover » qui fait virer les eaux au rouge et peu produire un dépôt de turbidite (avalanche subaquatique) bien visible par sondage acoustiques (Annexe 2). On remarque aussi la présence de sources subaquatiques dans le lac Pavin qui favorisent sa méromicticité et qui reflètent que le bassin versant topographique (l'espace drainant les précipitations et les particules sédimentaires vers le lac) et le bassin versant hydrographique (espaces collectant les eaux de surfaces et éventuellement souterraines jusque vers le lac) sont différents.

Le lac Pavin (Figure 1 et 2) compte une classification en Espace Naturel Sensible (ENS) qui est un espace « dont le caractère naturel est menacé et rendu vulnérable, actuellement ou potentiellement, soit en raison de la pression urbaine ou du développement des activités économiques ou de loisirs, soit en raison d'un intérêt particulier eu égard à la qualité du site ou aux caractéristiques des espèces végétales ou animales qui s'y trouvent ». Ces Espaces Naturels Sensibles ont donc un cadre législatif. Le lac Pavin profite du programme des Parcs Naturels Régionaux et site UNESCO ainsi que de l'Observatoire des Lacs Alpains qui est une base de données du CNRS-INSU concernant les systèmes lacustres français profonds situés dans les Alpes, le Jura et l'Auvergne. Cette démarche de suivi scientifique de la limnologie du Pavin traduit ainsi la prise de conscience que ce maar méromictique est soumis aux activités humaines et aux risques naturels (changement climatique, glissement de terrain, éruption limnique). L'objet lacustre du Pavin est étudié par diverses chapelles scientifiques (limnologie, sédimentologie, géomorphologie, palynologie, climatologie, microbiologie, géomythes (basé sur la base d'une approche géohistorique des archives (Annexe 2) du Pavin à la lumière des phénomènes qui se sont produits au Nyos en 1986 qui traduisent la découverte d'un nouveau risque naturel : l'éruption limnique. Cela a mené le ministère à lancer des études scientifiques pour évaluer les risques d'éruptions limniques du Pavin depuis plusieurs décennies.

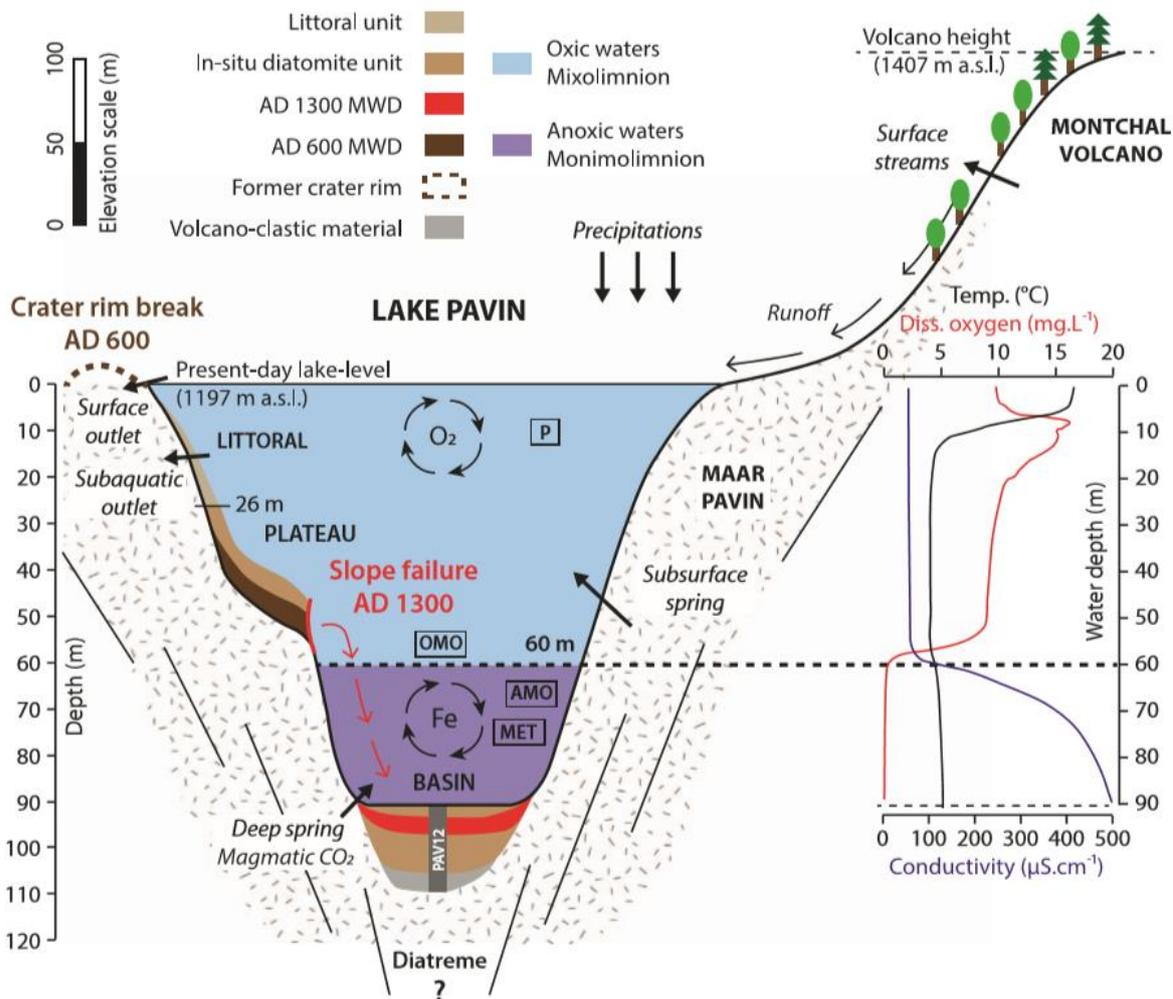


Figure 3 : Schéma synthétisant les spécificités du lac Pavin (d'après Chassiot et al, 2018). On observe notamment la stratification verticale des eaux du lac Pavin. On note aussi trois environnements : le littoral (0-26m de profondeur), le plateau (26-55m) et le bassin anoxique profond (sous-60m de profondeur) séparée par une chemiocline à 60 mètres qui délimite les eaux avec ou sans oxygène. La rupture du cratère en AD 600 aurait généré une chute abrupte de 9 m du niveau du lac ainsi qu'un glissement subaquatique (mass wasting deposit MWD) sur le plateau, alors que le tremblement de terre vers AD 1300 aurait favorisé un vaste MWD initié à la rupture de pente au bord du plateau et un affaissement à l'intérieur du bassin profond. Actuellement, le lac Pavin est alimenté par des précipitations, le ruissellement des pentes boisées et plusieurs sources subaquatiques (vers 60 m de profondeur). Son bilan hydrique est équilibré par deux sorties ou exutoires : un aérien et un subaquatique vers 20 m de bathymétrie environ. La carotte PAV12 ayant permis de caractériser la composition du remplissage sédimentaire du lac depuis sa formation est située au centre du bassin central. Celui-ci se compose de sédiments volcanoclastique (figuré gris) et de sédiments lacustres riche en matière organique (diatomites ; figuré beige) au sein desquels s'intercale un dépôt de glissement de terrain daté aux environs de l'an 1300 (figuré rouge).

1.2.2.b Le lac d'Issarlès

Le lac d'Issarlès situé dans la commune éponyme, est le seul grand lac d'Ardèche et la pierre angulaire de l'un des aménagements hydro-électriques les plus importants du département. Il est ancien et profond (108 mètres), communale, la baignade, la pisciculture, la pêche, le tourisme (randonnée, camping, maison troglodytes) sont autorisés. Situé proche des sources de la Loire il ne possède ni exutoire, ni tributaire en surface, mais une résurgence à l'Ouest du cratère

du lac d'Issarlès connecte les eaux de celui-ci avec la Loire. Il n'y a que quelques rares études scientifiques (Coûteaux, 1986 ; Defive et al, accepté) qui témoignent que ce lac a été exposé à des risques de glissements de terrains subaquatiques.

Ce lac de 97 hectares est le plus profond de trois systèmes étudiés avec 108 mètres de colonne d'eau (Delebecque, 1898) et il voit son niveau régulièrement oscillé entre 960 mètres et 1001 mètres d'altitude en fonction de la régulation d'EDF qui se fait par une conduite souterraine située à 50 mètres sous le niveau du lac (Hugo, 1959 et Jourde et al, 2015 (Annexe 3)) avec une moyenne estivale à 998,50 mètres (Coûteaux, 1984). Il est à noter qu'avant les travaux qui se sont déroulés entre 1947 et 1954 le niveau du lac était stable à 997 mètres d'après Delebecque en 1898 (Coûteaux, 1984). Ce lac est un site touristique depuis les années 1950 dans lequel s'est développé des activités de pisciculture, de baignade ainsi qu'un camping et des habitats troglodytes en bordure du lac. D'un point de vue scientifique le site fait l'objet d'études géologiques et archéologiques (Raynal et Kieffer, 2002) visant à préciser l'histoire des premiers peuplements au temps du volcanisme du Velay ainsi que de leur impact sur l'environnement. La géomorphologie dans laquelle le lac d'Issarlès évolue est intéressante puisque des trois lacs étudiés lors de ce stage ce serait le plus ancien même si son âge est en cours de révision. Il se rattache supposément au second épisode volcanique du Bas Vivarais, une zone de 500 kilomètres carré (Raynal et al., 2019, Defive et al., accepté) qui regroupe l'apparition de divers volcans dont celui de la Cherchemuse où culmine le bassin versant du lac d'Issarlès (Raynal et al., 2019, Defive et al., accepté (Figure 4)).

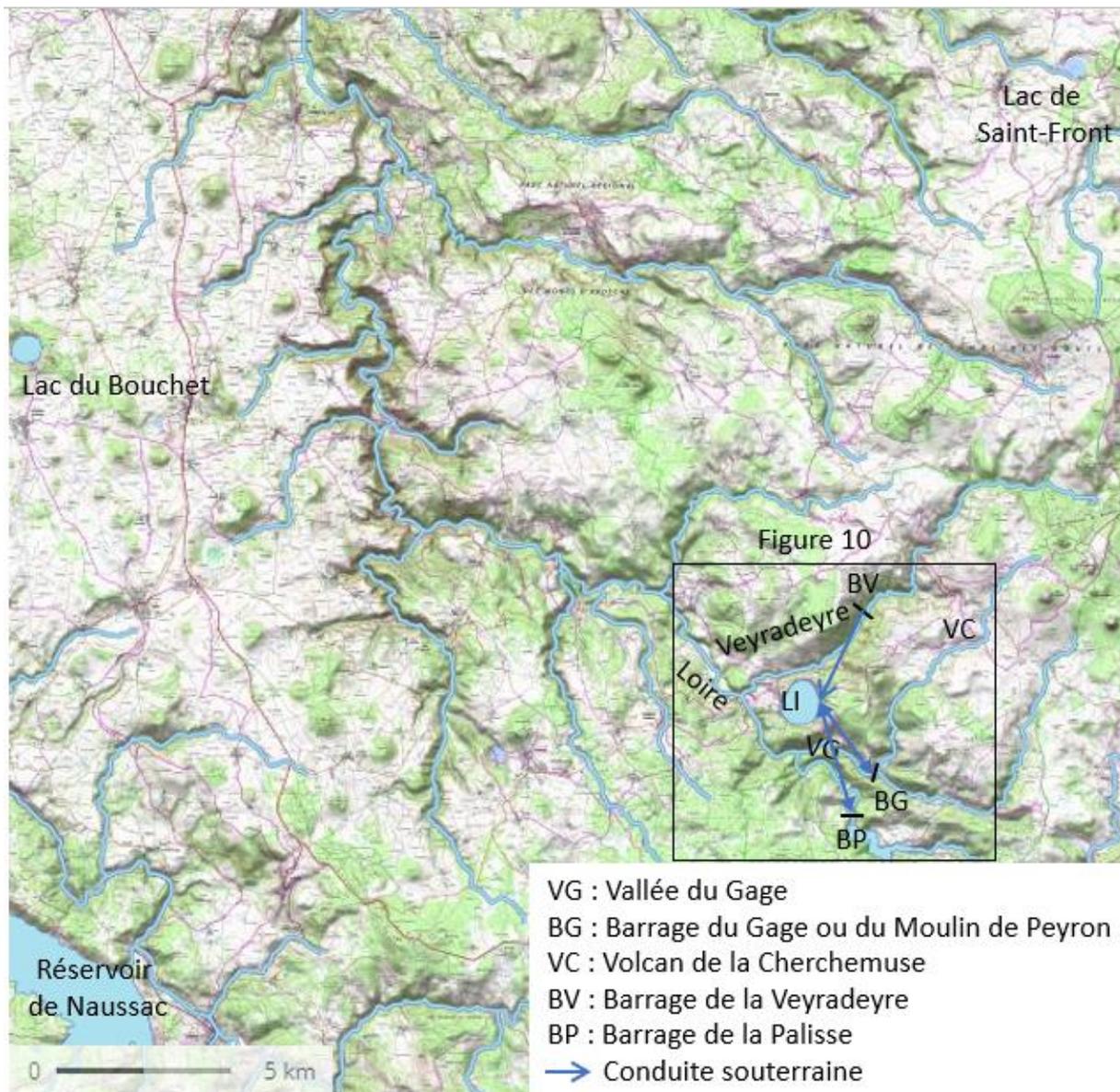


Figure 4 : Carte de localisation générale des alentours du lac d'Issarlès avec les lacs maars du Bouchet et de Saint-Front ainsi que les barrages hydroélectriques géré par EDF et celui de Naussac utilisé pour l'irrigation.

Le lac d'Issarlès est limitrophe du parc naturel régional et du Géoparc mondial des Monts d'Ardèche (Figure 2). Le label s'appuie sur trois piliers : Préservation : une meilleure connaissance scientifique des sites permet d'orienter et d'adopter, si nécessaire, des mesures de gestion pour la préservation des richesses géologiques. Education : dans un Géoparc, la géologie est une porte d'entrée privilégiée pour la sensibilisation à l'environnement et au territoire. Tourisme durable : Le géotourisme participe au développement local à travers un tourisme durable orienté sur la thématique de la géologie et de l'archéologie.

1.2.2.c Le gour de Tazenat

Le gour de Tazenat c'est formé au Tardiglaciaire, il est privé et la baignade, la pêche et la randonnée par le biais de chemins sont autorisés. C'est un maar du plateau cristallin des Dômes (Valentine et al., 2019) situé dans la commune de Charbonnières-les-Vieilles au Nord du département du Puy-de-Dôme et marque la limite Nord de la Chaîne des Puys. Situé à proximité du volcan de Volvic et du parc des Volcans d'Auvergne, mais aussi en bordure de l'autoroute ce lac n'est pas visible dans le paysage, il est donc connu par les locaux et les amateurs de géologie, de pêche ou de baignade. Ce maar de 67 mètres de fond à 633 mètres d'altitude situé à l'Ouest de la faille de la Limagne trouve sa place dans un cratère formé dans le coude du ruisseau de Rochegude. Son éruption phréatomagmatique est datée entre 29 000 et 34 000 par datation au béryllium 10, faisant ainsi de ce lac un des plus jeunes de la Chaîne des Puys (Valentine et al., 2019). Ce lac n'a cependant jamais été englacé. Le Gour de Tazenat est privé mais il a une fonction touristique et se situe dans le Parc Naturel régional des Volcans d'Auvergne, tout comme le lac Pavin. L'étude du bassin versant (de Crespin et al., 2000) montre qu'il est agricole et souligne le rôle de l'étang de Rochegude situé en amont du lac sur le piégeage des intrants déversés dans le lac. Il y a aussi un historique de la végétation et une étude de la dynamique sédimentaire du Gour de Tazenat (pollen, tephres régionaux, et turbidités holocène) d'après l'étude de Juvignié et al., (1998). Ces études montrent des anomalies géomorphologiques dans le bassin versant et le tributaire ainsi que le rôle de l'homme sur la végétation et le changement de la sédimentation qui ne serait donc pas uniquement lié au climat. Depuis 2016 le gour est exposé à des blooms de cyanobactéries interdisant la pêche et la baignade (Figure 5). Des études ont donc été lancées en 2017 à GEODE en collaboration avec l'université de Tours (étude sur l'érosion des sols) et de l'université de Clermont-Ferrand (étude sur les cyanobactéries). Le projet PALEOBLOOM financé par le CNRS en 2020-2021 ainsi qu'une campagne de grand carottage prévue en Octobre 2020 ont pour but d'étudier ce phénomène d'eutrophisation du plan d'eau.

1.3 Définition

La notion de « Lac » est, comme de nombreux objets géographiques, simple à appréhender mais compliquée à définir. Selon Touchart (2000) un lac est « un plan d'eau continental (séparé de la mer, dominé par son bassin [versant] et développant une personnalité

propre) [temporel], dont la profondeur, la superficie ou le volume sont suffisants pour provoquer un étagement, une zonation ou une régionalisation des processus limniques. ». On note pour les trois lacs étudiés qu'ils correspondent à ces critères puisque les maar Pavin, d'Issarlès et de Tazenat n'ont aucun lien avec la mer, ils sont régis par des bassins versants de tailles divers (restreint mais faillé pour Tazenat (Valentine et al, 2019) et immense pour Issarlès suite aux travaux EDF (Jourde et al, 2015)). Leurs eaux sont stratifiées en température (notamment l'été) mais aussi chimiquement, avec l'exemple du lac Pavin et de sa méromicticité délimitée par la chemiocline à 60 mètres de fond (Figure 3). Cependant ces lacs sont des maars c'est-à-dire qu'ils résultent d'une éruption volcanique et sont donc de forme circulaire, petits, profonds et ceint d'un croissant pyroclastique qui est hétérogène (composé de matériaux volcanoclastiques de tailles et compositions différentes). Ces bassins versant topographiques sont donc plus ou moins facilement érodable et susceptible d'apporter des sédiments dans le lac. Les croissant pyroclastique sont aussi plus ou moins solide et cela induit un risque particulier de rupture du cratère au niveau de l'exutoire (Chassiot et al., 2016, 2018) et une chute abrupte du niveau du lac, produisant une crue catastrophique en aval remobilisant les sédiments du croissant pyroclastique (« catastrophic outburst flood events », Chassiot et al., 2016).

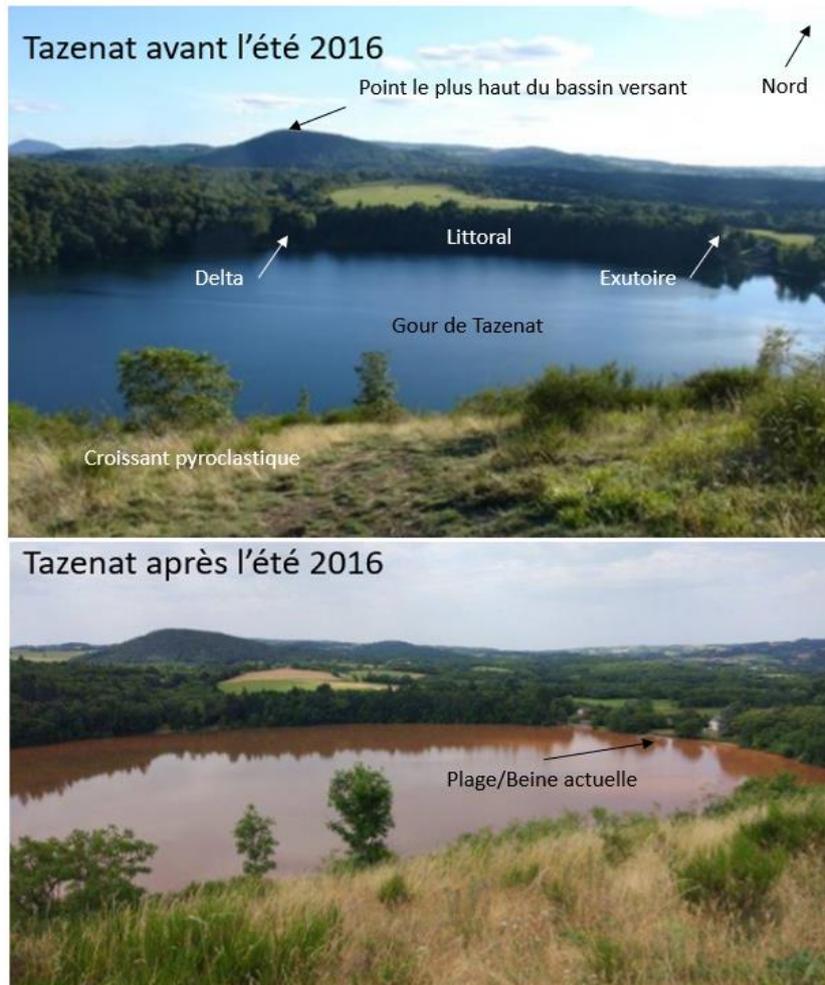


Figure 5 : Rephotographie effectuée au Gour de Tazenat montrant l'impact paysagé du bloom de cyanobactérie ainsi que les principaux éléments d'un maar.

Bien que particuliers ces maars possèdent les mêmes caractéristiques que les autres lacs. Une beine lacustre résulte du maintien d'un niveau de lac qui érode le littoral et se voit comblée par des apports de versants au pied de la pente (Figure 6).

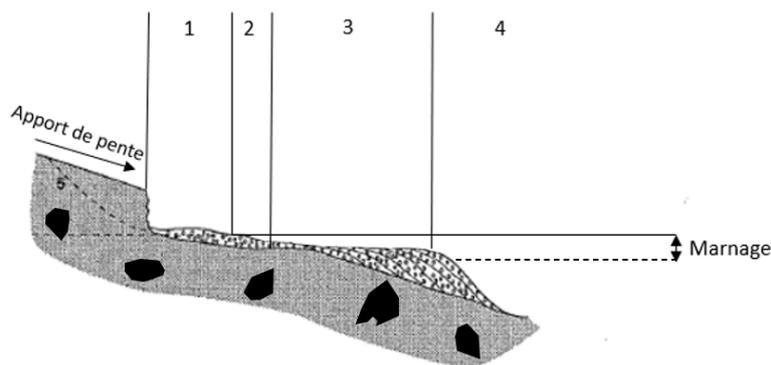


Figure 6 : Schéma d'érosion et de sédimentation d'une beine de maar (modifié d'après Campy et Meybeck, 1995) 1- Grève de pied de falaise, 2- beine d'érosion, 3- beine d'alluvion, 4- tombant, 5- croissant pyroclastique pouvant être hétérogène selon les couches impactées par l'éruption phréatomagmatique ; Marnage : variation saisonnière de la côte du lac (rapport précipitation/évaporation) et aussi équilibre apport et pertes hydriques (sources, tributaires et exutoires subaérien et ou subaquatiques).

Le bassin versant est l'espace (géographique) qui alimente un lac et voit les éléments qui le compose (sédiments, pollution, intrant) drainés par ce dernier (de façon naturelle ou/et artificielle, aérienne ou/et souterraine). Il est donc défini par sa taille, sa géomorphologie, sa géologie son occupation et aménagement des sols et donc son anthropisation. Il existe deux types de bassin versant : le premier est le bassin topographique qui est l'apport des eaux de ruissèlement le long des pentes qui mènent au lac (point bas et niveau de base local d'un réseau hydrographique) alors que le bassin versant hydrologique est l'apport d'eau au lac par les écoulements qu'ils soient aériens ou souterrains. Ainsi, s'il n'y a pas d'apports souterrains ces deux bassins versant sont les mêmes. Cela dépend principalement de la géologie du sous-sol.

Le delta est la zone où un cours d'eau se jette dans un lac, il est formé par les alluvions et l'eau apportés par ce cours d'eau. Quand l'apport alluvionnaire est important le surplus d'alluvion vient se déposer en aval du delta et fait progresser ce dernier dans le lac : c'est une progradation deltaïque. Cependant quand le lac baisse de niveau, le delta, qui est une zone plane (plaine deltaïque), se voit incisé par le cours d'eau en raison de l'abaissement du niveau de base du cours d'eau et du principe de maintien d'un profil d'équilibre d'un cours d'eau. Les restes d'un delta incisé (ou ennoyé selon si le lac chute ou inonde une région) sont appelés paléodelta (Figure 7). L'exutoire quant à lui est le déversoir du lac dont le niveau et la morphologie peuvent varier si le niveau du lac change. Il existe des lacs sans exutoires (lacs endoréiques, tel que le lac Titicaca, ou le lac Dadz Co) dont les bassins versants ne sont donc pas connecté à un fleuve et le niveau du lac dépend donc des pertes par évaporation dans l'atmosphère ou des apports par précipitation (pluie, fonte des neiges ou des glaciers). Dans certain contexte il est donc possible de retrouver des morphologies de paléolittoraux, de paléo-delta ou de paléo-exutoires.

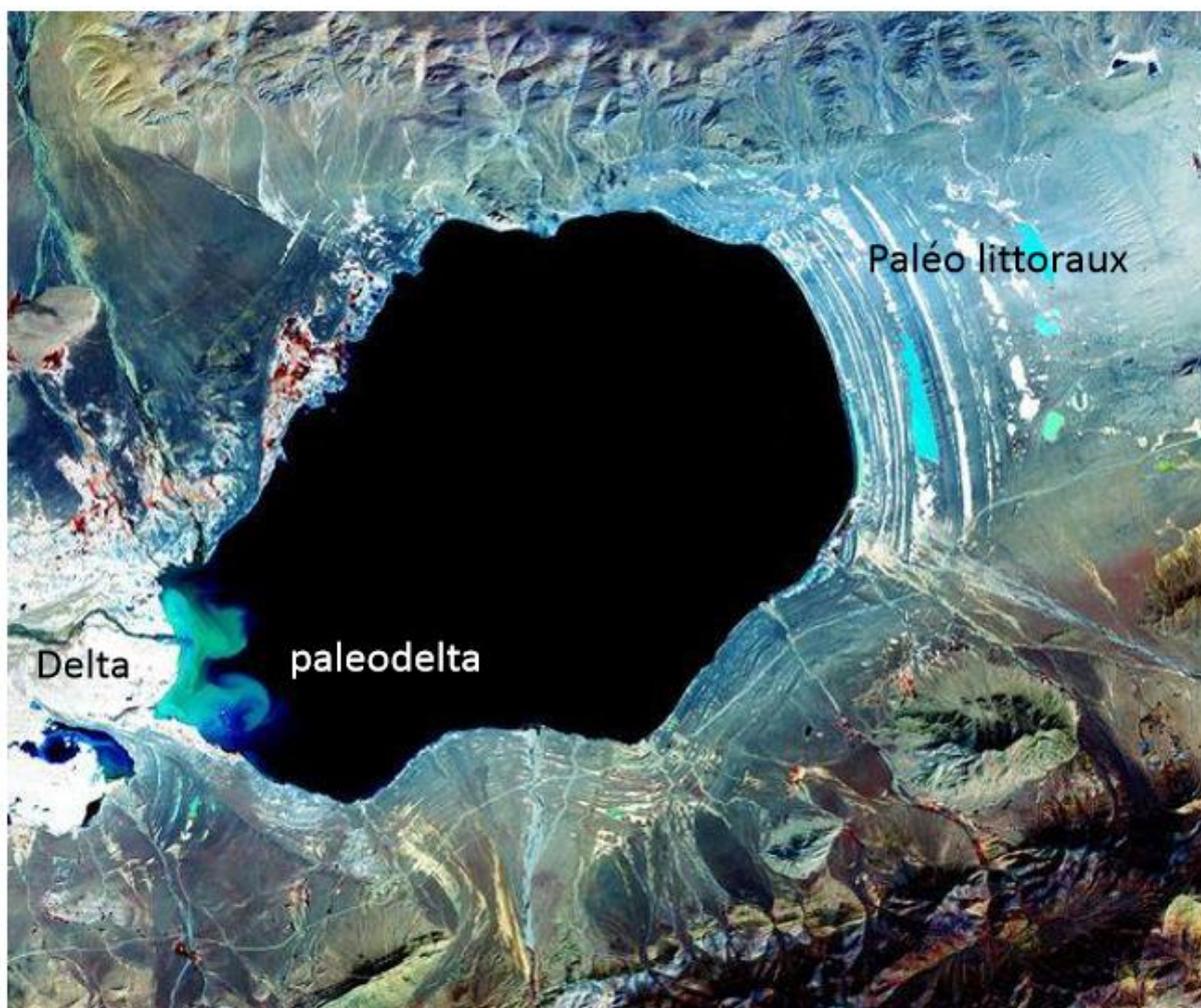


Figure 7 : Image du lac Dagze Co prise par le capteur ASTER du satellite Terra le 8 octobre 2001 montrant un delta lacustre, un paléodelta immergé et des paléolittoraux émergés.

Il convient de définir les manifestations de changement de niveau de lac qui sont double. D'une part la présence de paléolittoral, comme pour le maar italien d'Albano (Anzidei et al., 2010) et d'autre part la présence de paléodelta comme sur le lac Dagze (Figure 7). Pour le lac d'Albano on dénombre quatre paléolittoraux sous le lac actuel (Anzidei et al., 2010). Ces niveaux de lac sont visibles sur la bathymétrie multifaisceaux par les zones planes qui ressortent en blanc alors que les tombants de ces beines sont en noir par effet d'ombrage sur la visualisation du MNT (Figure 8). Le fait que ce lac ait des paléobeines subaquatiques indique qu'il a connu dans le passé un niveau inférieur au niveau actuel (les chutes sont datées de 3800, 1600, 398 ce dernier niveau correspond à une surverse du lac).

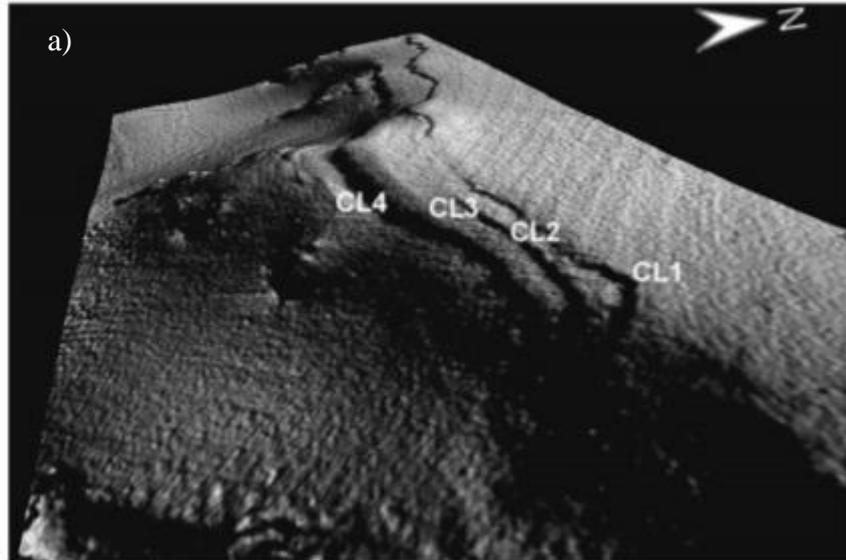


Figure 8 : d'après Anzidei et al., 2010 : a) Image de la bathymétrie multifaisceaux du lac d'Albano montrant les beines submergées (CL1 à CL4) localisées entre 21 et 41 mètres de fond.

Il y a aussi la question de la sensibilité des lacs aux principaux risques naturels (séismes, éruptions volcaniques avec les tephres [dépôt de cendres], glissements de terrain). Les risques peuvent se combiner et devenir parfois catastrophiques comme par exemple l'éruption limnique du Nyos en 1986 qui serait liée à un séisme ayant induit des glissements de terrain (terrestres et subaquatiques) ayant probablement favoriser le dégazage (CO₂, CH₄) du monimolimnion (eaux profondes anoxiques).

1.4 Problématique

Quelles sont les manifestations géomorphologiques et sédimentaires de l'évolution à l'exposition des risques naturels des trois lacs volcaniques les plus profonds du Massif Central français (maar d'Issarlès, Pavin et Tazenat) ? Quelles sont les causes et conséquences de telles manifestations ? Quelles traces géomorphologiques ou sédimentaires, mais aussi quels types d'archives pourraient permettre de dater ce type de changements environnementaux et paysagers en Auvergne ?

Pour étudier ces trois lacs emblématiques, sensibles et soumis aux risques naturels nous allons les comparer entre eux puisqu'ils représentent la diversité des maars auvergnats. Nous allons d'une part coupler l'approche géomorphologique et topo-bathymétrique avec l'étude des processus sédimentaires dans les lacs et d'autre part étudier ces systèmes par le prisme de l'approche géohistorique des environnements, des paysages et des activités humaines. L'approche bathymétrique pour étudier ces lacs date de la fin du XIX^{ème} siècle avec l'étude d'André Delebecque qui fit la bathymétrie de ces trois lacs (Figure 9).

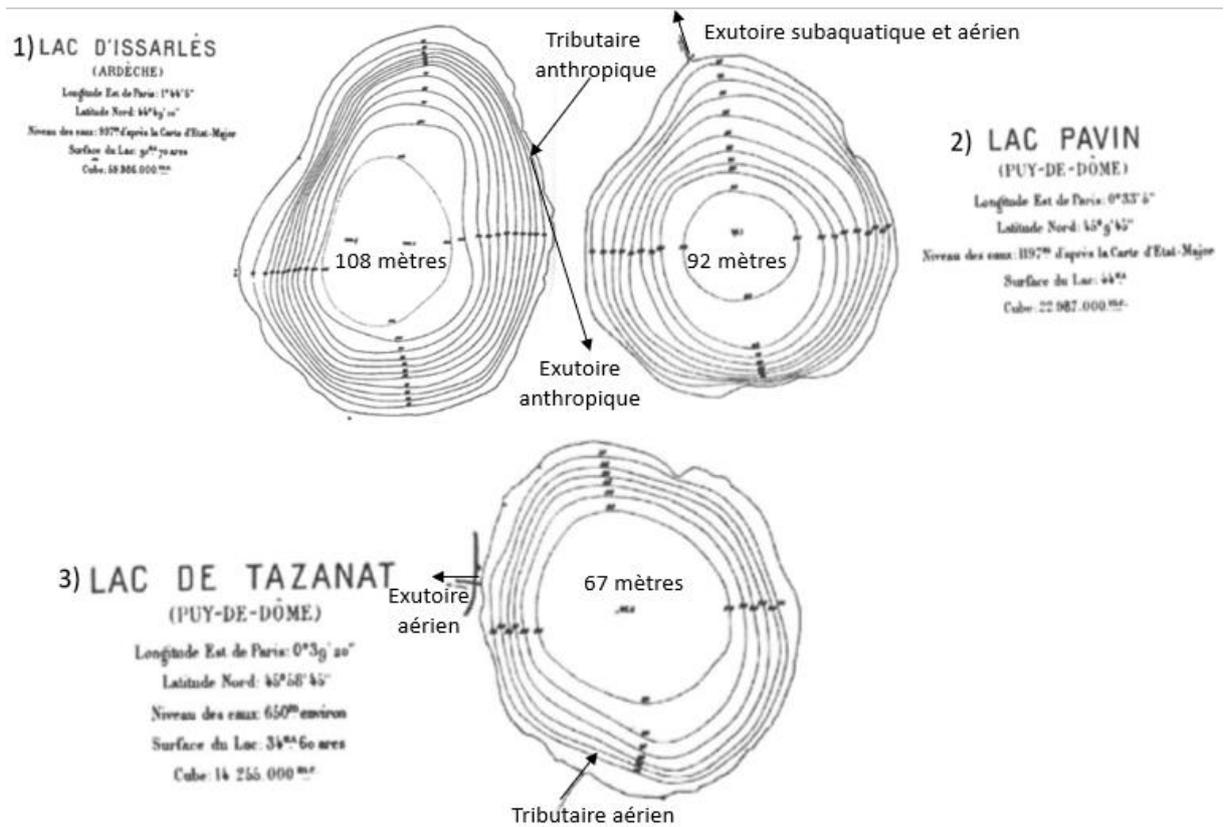


Figure 9 : Carte bathymétrique de 1898 de Delebecque 1- Lac d'Issarlès (Ardèche) ; 2- Lac Pavin (Puy-de-Dôme) 3- Lac de Tazanat (Puy-de-Dôme) ; d'après Delebecque 1898. * L'altitude du lac de Tazanat donnée par Delebecque de 650 mètres ne correspond pas avec l'altitude actuel de 633 mètres de ce lac. Cela ne correspond pas non plus à la carte de l'Etat-Major qui donne un exutoire à 639 mètres (Annexe 3).

2 – Sites, Matériels et Méthodes

2.1 *Le lac d'Issarlès*

2.1.1 Sites d'Issarlès

On voit sur cette carte IGN ombragée que le lac d'Issarlès (Figure 4) se situe au coude de la Veyradeyre et de la Loire et est proche de deux maars moins profonds qui eux sont étudiés par forage et dont on sait qu'ils portent la trace de glissements de terrain datant du tardiglaciaire. On remarque aussi que le lac est proche de trois barrages. Le barrage de la Palisse fût construit entre 1951 et 1954, celui du Gage date de 1967 et enfin celui de la Veyradeyre est contemporain des travaux fait sur le lac d'Issarlès (entre 1947 et 1954). Ce maar est aussi alimenté naturellement par des sources subaquatiques, deux ruisseaux permanents : La Clède et celui du Ravin des Charbonneyres ainsi que deux temporaires celui de Montchamps et celui du Col du Gage (Coûteaux, 1984 et Jourde et al, 2015).

L'aménagement hydro-électrique du lac fût adopté par Assemblée Nationale le 18 Novembre 1948 et reconnu d'utilité publique le 21 Mars 1949 (Jourde et al., 2015) et consiste en la construction de 24 kilomètres de galerie ainsi que de trois barrages (Veyradeyre à 1011 mètres, sur le Gage à 1010 mètres, et sur la Loire à La Palisse à 1010 mètres) ces barrages ont pour but de rehausser le niveau des eaux pour permettre un écoulement constant (Jourde et al., 2015, Hugo, 1959) (Annexe 2 ; Figures 4, 10 et 11). Le raster 1 mètres permet de mettre en exergue les canyons qui alimentent les cours d'eau et le lac d'Issarlès mais ne permet pas de voir des morphologies précises ni de routes.

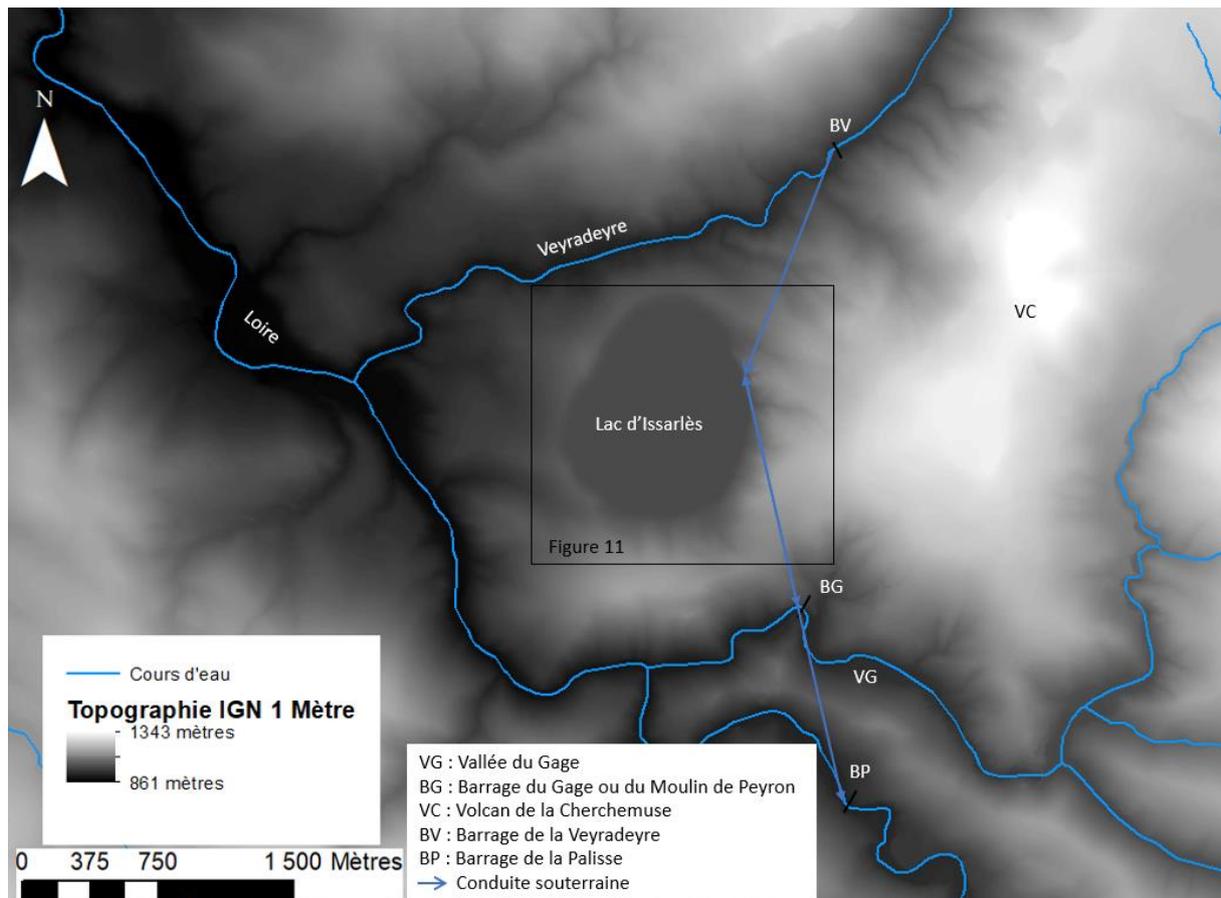


Figure 10 : Carte topographique 1 mètre des alentours du lac d'Issarlès avec les installations EDF.

De plus, depuis qu'EDF utilise le lac pour produire de l'hydro-électricité, ce dernier est aussi alimenté artificiellement par les eaux de la Veyradeyre avec le barrage en aval du Béage, les eaux du Gage avec le barrage du Moulin du Peyron et enfin de la Loire avec le barrage de la Palisse (Coûteaux, 1984). On note enfin l'absence d'exutoire à ce lac (Figures 10 et 11). Ces travaux ont donc modifié le bassin versant par les apports des conduites souterraines et donc le bassin versant topographique ne correspond plus du tout au bassin versant hydrologique initial. Il est à noter que plusieurs autres projets plus ou moins fantasques ont été imaginés sans jamais voir le jour pour ce lac avec entre autre le détournement de ses eaux pour alimenter Paris ou le réhaussement de ses rives (Jourde et al, 2015).

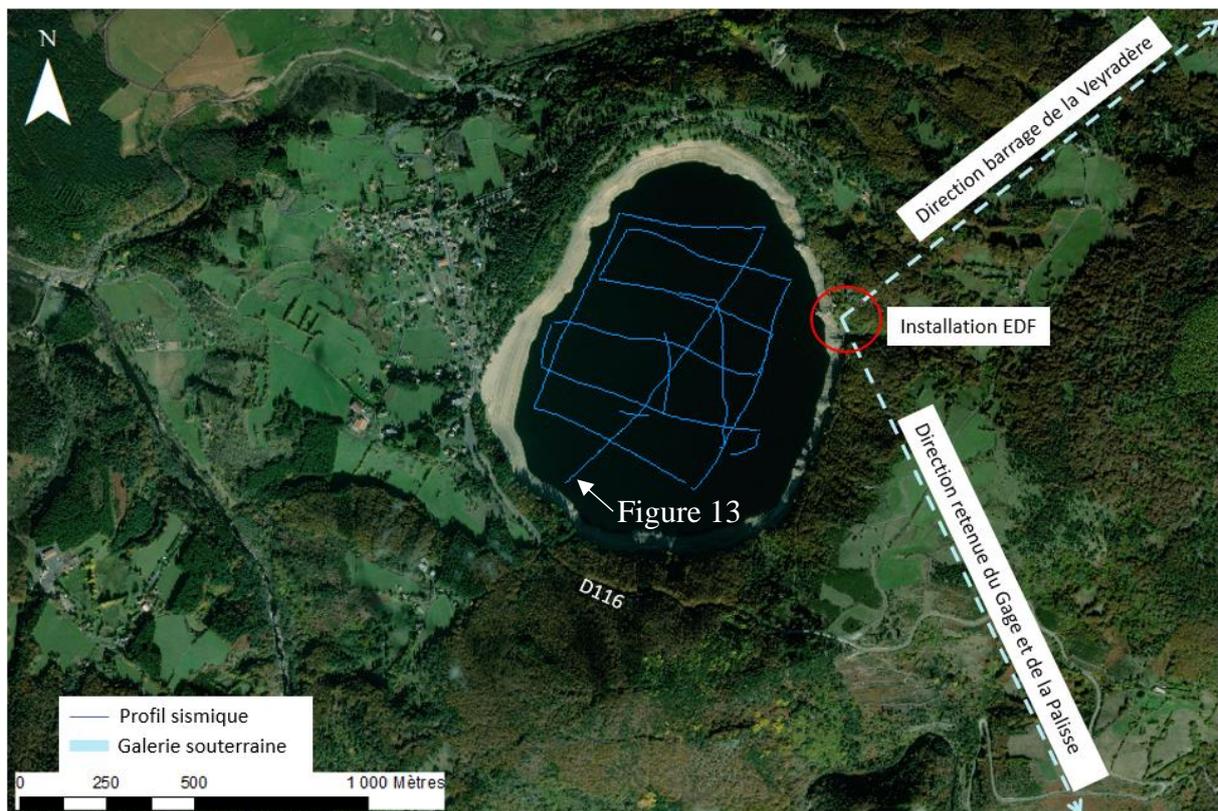


Figure 11 : Photographie aérienne du lac d'Issarlès avec les aménagements EDF. La grille sismique réalisée en 2019 dans le lac et la localisation de la figure 13 est aussi indiqué par les tracés en bleu.

Sur la figure 11 on voit que les abords du lacs sont arborés avec à l'Est le lieu-dit du Lac d'Issarlès et quelques champs. Avant la construction des aménagements les entités proches du lac étaient majoritairement sylvicoles (Coûteaux, 1984) et agricoles au vu des données paléo-environnementale qui confirment une activité agropastorale (présence de pollens de seigle noir) qui suggère une continuité des pratiques agraires depuis la fin de la période romaine (IV^{ème} siècle) entraînant une déforestation notable de la vallée du Gage (Defive et al. 2018).

2.1.2 Acquisition de profil sismique par « chirp »

L'acquisition des profils sismiques a été faite grâce à un appareil de sismique réflexion KNUDSENTM émetteur-récepteur de type « Chirp » (Figure 12) émettant du 4, 14 et 200 kHz. La campagne de collecte de données sismiques de 2019 faite à comporte 22 profils sismiques fait au 4kHz. Les hautes fréquences de ce sondeur de sédiment (4 et 14 kHz), permettent d'observer la géométrie du remplissage sédimentaire accumulé dans ces lacs volcaniques, et la très haute fréquence (200 kHz) sert à déterminer l'interface eau-sédiment, pouvant être utilisée pour produire la carte bathymétrique – il faut cependant noter ici que le faible maillage des campagnes ne permet pas de dresser un carte bathymétrique fiable, mais simplement de confirmer les mesures de Delebecque. Le système KNUDSENTM 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 géolocaliser chaque tir sismique. 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. (Chapron et al., 2007 et 2010). L'ensemble de ce dispositif est transporté par une petite embarcation, propulsée par un moteur électrique (Chapron et al., accepté, Arricau, 2019). Cette technique permet d'avoir des relevés de profondeurs sur une ligne complète et non en un seul point comme avec la méthode de Delebecque (Figure 12 c et d).

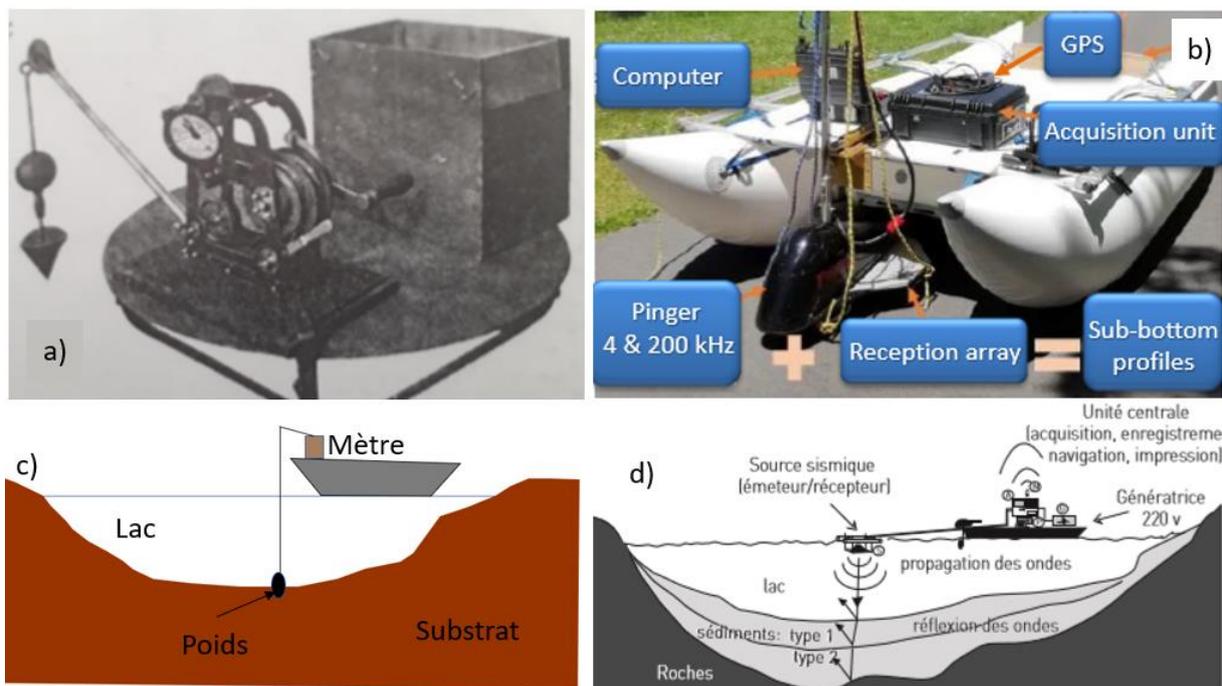


Figure 12 : a) Sondeur Belloc utilisé par Delebecque lors de ses bathymétries qui permettait de prendre la profondeur en un point ; b) Matériel utilisé lors de la bathymétrie par « chirp » avec un émetteur-récepteur relié à un boîtier d'acquisition, un GPS et un ordinateur ; c) Schéma montrant la mesure en un point de Delebecque qui consiste à faire couler un poids et regarder à quelle profondeur il heurte de fond du lac ; d) Principe de la cartographie sismique réflexion de type « chirp », Chapron et al, 2007.

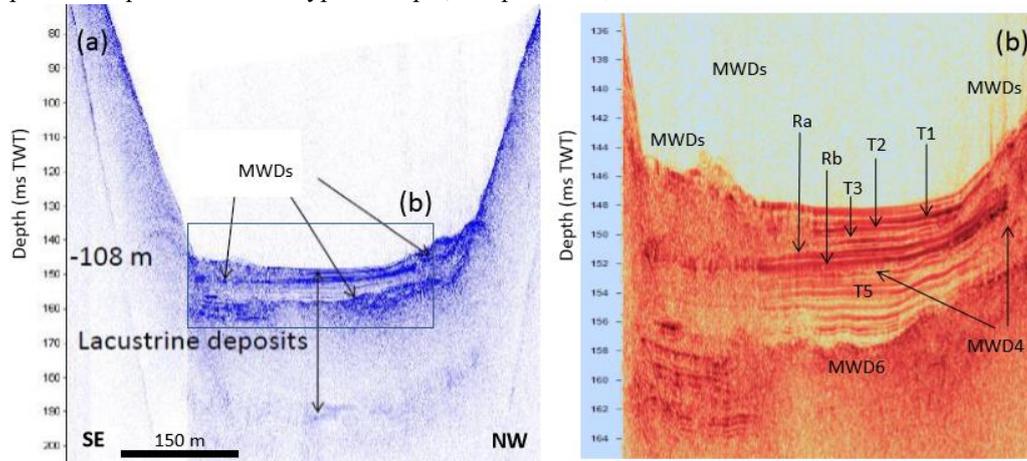


Figure 13 : Profil sismique du maar d'Issarlès montrant les différents remaniements du matériel sédimentaire (MWD) avec leur tubidites distales (T) et deux traces de de réflecteurs plus forts (Ra et Rb) ; a) fenêtre du logiciel Seisec et b) fenêtre du logiciel EDIFISeg. L'échelle verticale est donnée en temps (milliseconde temps double).

La figure 13 est un exemple de profil sismique obtenu par « chirp ». On observe sur ce profil de nombreux remaniements du matériel sédimentaire laissant ainsi voir différents dépôts de glissement de masse au pieds des pentes du cratère (Mass Wasting Deposit en anglais – MWD sur les figures 13 et 25). Ces dépôts de glissement de masse se voient par leur faciès chaotique. Au bout de ces dépôts de glissement de masse on remarque une longue et fine protubérance qui est l'endroit où ils sont les plus fins. Ces protubérances sont appelées des

turbidites. Entre les turbidites 3 et 5 (T3 et T5) on remarque deux signatures fines et sombres à forte réflexion. En dehors de ces profils sismiques il n'y a que la carote de 1984 de Coûteaux qui donne une stratigraphie du lac. D'après les données le site de Coûteaux était uniquement composé de glissements accumulés en pied de pente.

2.1.3 Intégration des données topographiques et bathymétriques pour utiliser les données anciennes sur SIG.

2.1.3.a Logiciels utilisés pour le traitement SIG

ArcGIS est un système d'information géographique 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.).

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 par Dominique Laffly et les informaticiens de GeoHyd pour lire les données du sondeur de sédiment (format SEGY) et pour 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).

2.1.3.b Méthodologie

Les modèles numériques de terrains (MNT) utilisés dans le cadre du stage sont d'une part le MNT RegAlti 1 mètre de l'IGN avec une emprise de 1 kilomètre sur 1 kilomètre et une résolution de l'ordre du mètre alors que le Lidar à quant à lui une résolution de l'ordre de la 40 cm (Van-Wiersts et al., 2017). Le Lidar fait donc partie de la famille des Modèles Numériques de terrain, c'est-à-dire que l'altitude de chaque pixel est donnée par pour le sol et non pour la strate arborée, contrairement au Modèle Numérique d'Élévation – MNE (Van-Wiersts et al., 2017). Cette précision est précieuse dans l'étude de la géomorphologie lacustre puisqu'elle permet une étude fine de la géométrie des rivages afin de rechercher des indices sur les fluctuations de niveaux des lacs.

La bathymétrie utilisée à une résolution de l'ordre de cinq centimètres pour le lac Pavin ainsi que pour les profils sismiques effectués dans les trois lacs (Figures 11, 17 et 24). La bathymétrie globale du lac d'Issarlès et de Tazenat résulte de la digitalisation des cartes de 1898 de Delebecque avec des isolignes espacées de 10 mètres (Figure 8).

Les MNT utilisés pour ce travail proviennent de l'IGN (résolution de 1 mètre) pour le lac d'Issarlès et du CRAIG pour les levés Lidar disponibles pour les lacs de Tazenat et du Pavin (Annexe 4).

Ici, il sera question de développer la méthode cartographique utilisée pour obtenir et compiler ces MNT. 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 commandées 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, on nomme le raster de sorti nouvellement créé en rentrant manuellement l'extension .tif et l'on renseigne son type de codage (ici, 32bit flottant). On obtient donc une seule dalle regroupant nos Modèles Numériques de Terrain.

Selon moi l'une des meilleures façons d'exploiter ces MNT extrêmement précis est de les étudier sous la forme de cartes des pentes : pour cela on utilise la fonction *slope* de *3D analyst* (Figure 14).

Une fois le MNT de la bathymétrie chargé, on découpe le raster des dalles MNT de la topographie obtenue précédemment avec les fonctions classiques de gestion de raster pour laisser un espace libre à l'emplacement du lac (là où l'on a la bathymétrie) puis on refait une fusion entre la bathymétrie et le raster de la topographie préalablement découpé.

Pour les lacs d'Issarlès et de Tazenat la bathymétrie correspond d'une part au géoréférencement à la digitalisation des cartes anciennes de Delebecque de 1898 (Figure 8). Les profils sismiques (Figure 11) disponibles dans ces deux lacs ont d'autre part été digitalisé et exporté au format shapefile, polyligne ZM grâce au logiciel EDIFISegy. Une fois ces deux données importées dans Arcmap on les interpole avec la fonction *Topographie* de *3D Analyst* d'ArcMap en saisissant exclusivement les paramètres d'acquisition des variables Z qui sont des points d'élévation.

Ces rasters topobathymétriques sont maintenant utilisables pour la délimitation des bassins versants topographiques mais aussi la réalisation de bloc 3D permettant une meilleure visualisation de la zone d'étude et de son relief pour des personnes tiers ne connaissant pas ou peu la zone où prend place l'étude. Pour réaliser ces blocs 3D, on charge les données rasters dans Qgis puis on utilise l'extension Qgis2threejs. Grâce à cette extension on ajoute les couches qui vont habiller le bloc 3D (les textures) avec *Layer image*, ici on utilisera uniquement les photographies orthonormées du fond BD Ortho de l'IGN grâce à l'extension *Quick Map Services*. Une fois le bloc 3D réalisé ce dernier s'ouvre dans un onglet de type internet (Google Chrome, Internet Explorer ou Mozilla Firefox) puisque le fichier généré est un fichier html, ce qui implique que pour l'envoyer et le transmettre à un tiers il faut regrouper le fichier html ainsi que les fichiers annexes qui lui sont reliés.

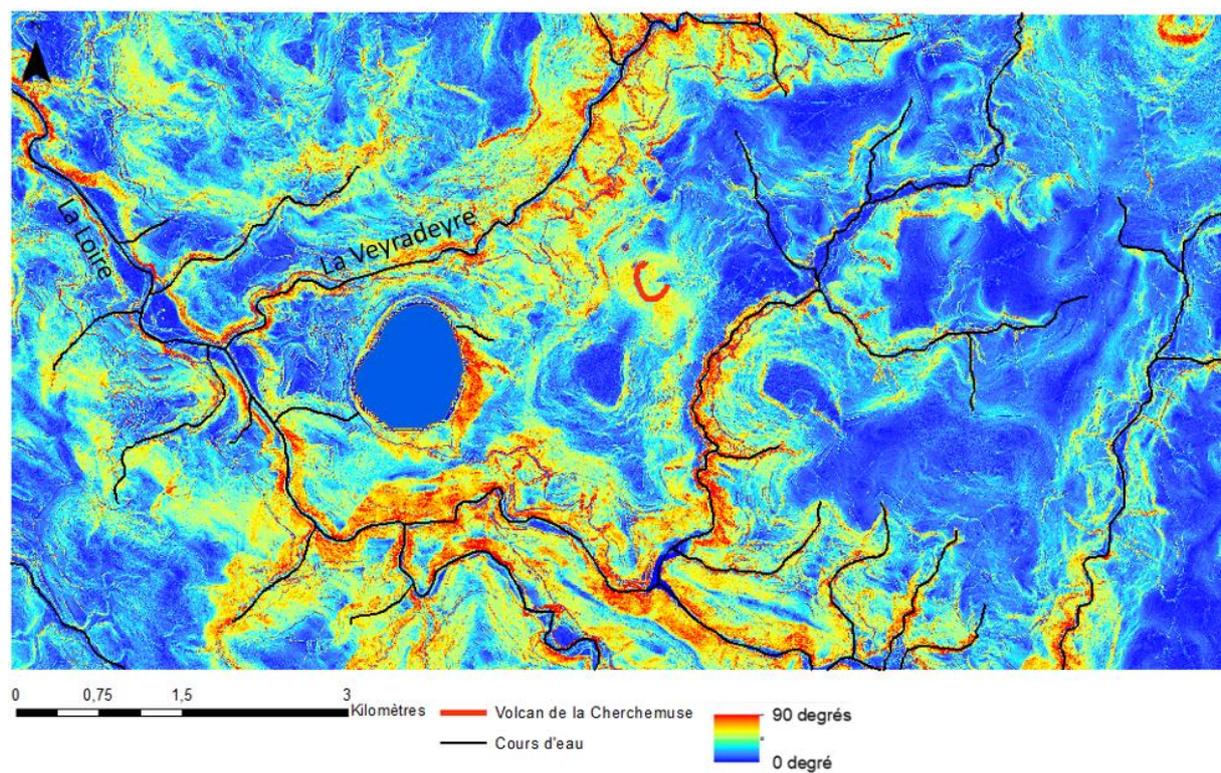
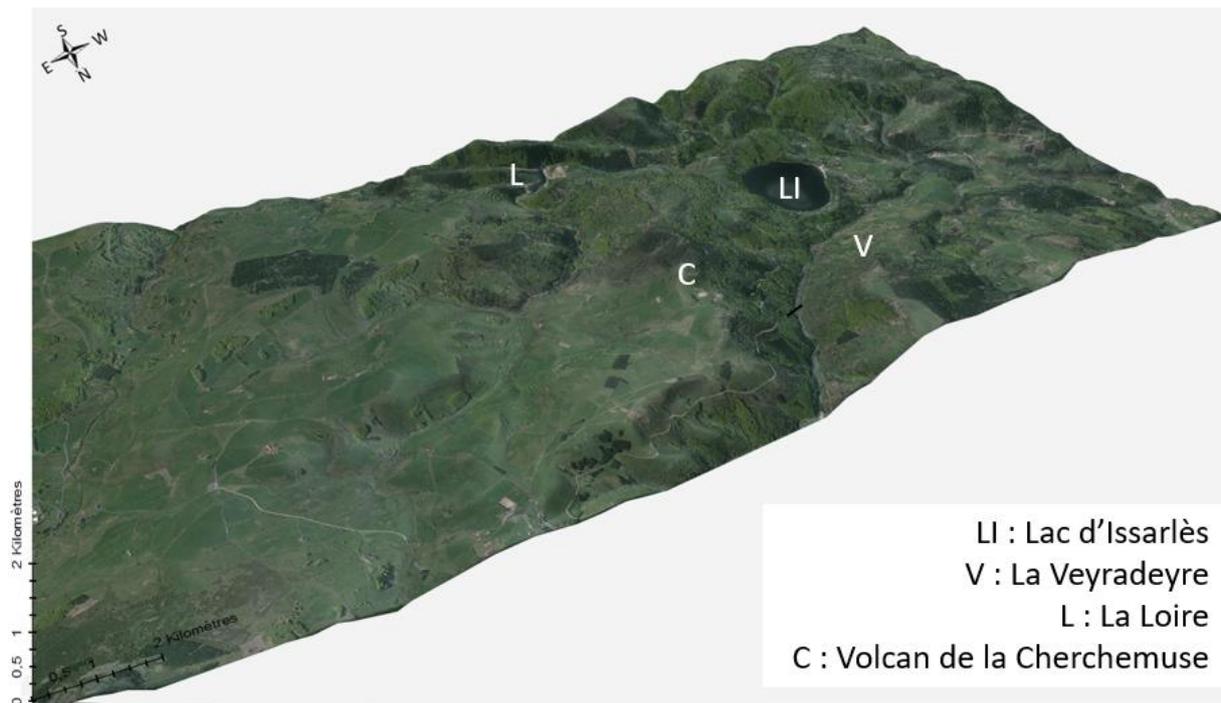


Figure 14 : a) Bloc 3D du bassin versant du lac d'Issarlès montrant les cours d'eau de la Loire et de la Veyradeyre, le barrage de la Veyradeyre et le volcan de la Cherchemuse ; b) Carte des pentes du bassin versant du lac d'Issarlès.

2.2 Le lac Pavin

2.2.1 Le site du lac Pavin

Le lac Pavin se situe entre la vallée glaciaire de la Couze Pavin au Nord et le Volcan du Montchal au Sud. Ce stratovolcan est un réservoir d'eau en raison de sa nature géologique qui laisse circuler l'eau. Le raster se voit ici affiné par le Lidar du CRAIG (Figure 15).

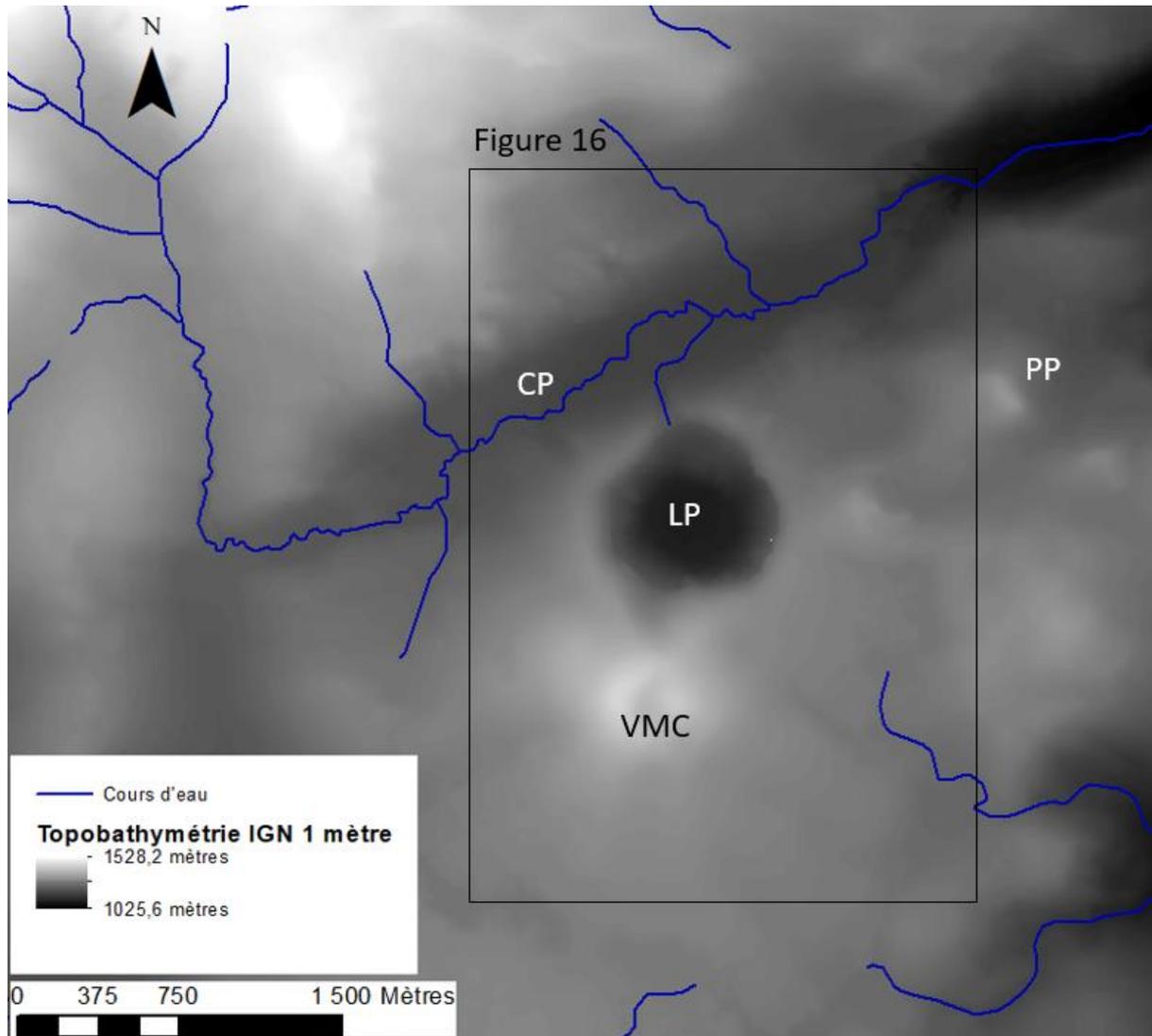


Figure 15 : Carte topobathymétrique des environs du lac Pavin. LP : Lac Pavin ; VMC : Volcan Montchal ; CP : Couze Pavin et PP : Puy du Pertuyzat.

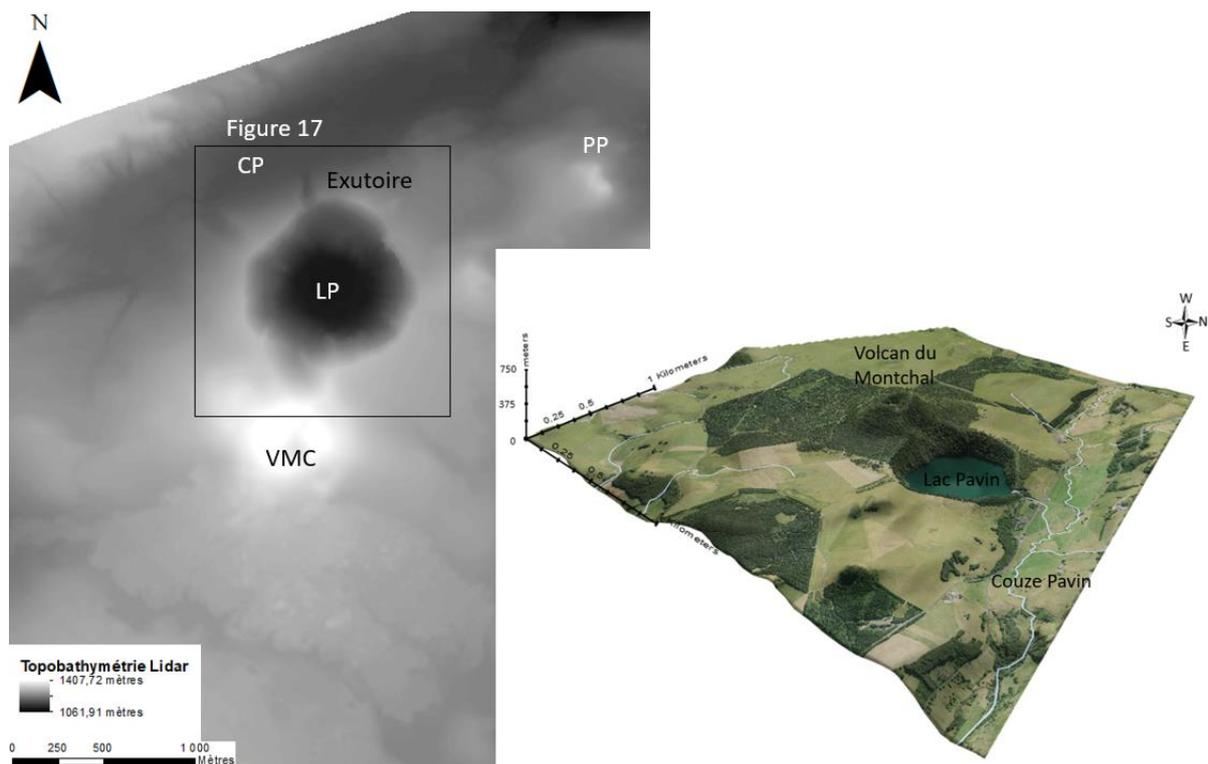


Figure 16 : Carte topobathymétrique du Lidar de Pavin. LP : Lac Pavin ; VMC : Volcan Montchal ; CP : Couze Pavin et PP : Puy du Pertuyzat ainsi que le bloc 3D associé.

Ce raster Lidar (Figure 16) permet de voir la géométrie du sol au Sud du Montchal aux environs de l'exutoire. Cette précision est déterminante dans l'étude de la géomorphologie lacustre puisqu'elle permet une étude fine de la géométrie des rivages afin de trouver des indices sur les fluctuations de niveaux des lacs. A ces données fines aériennes sont couplées des données fines subaquatiques avec la bathymétrie multifaisceaux (Figure 17).

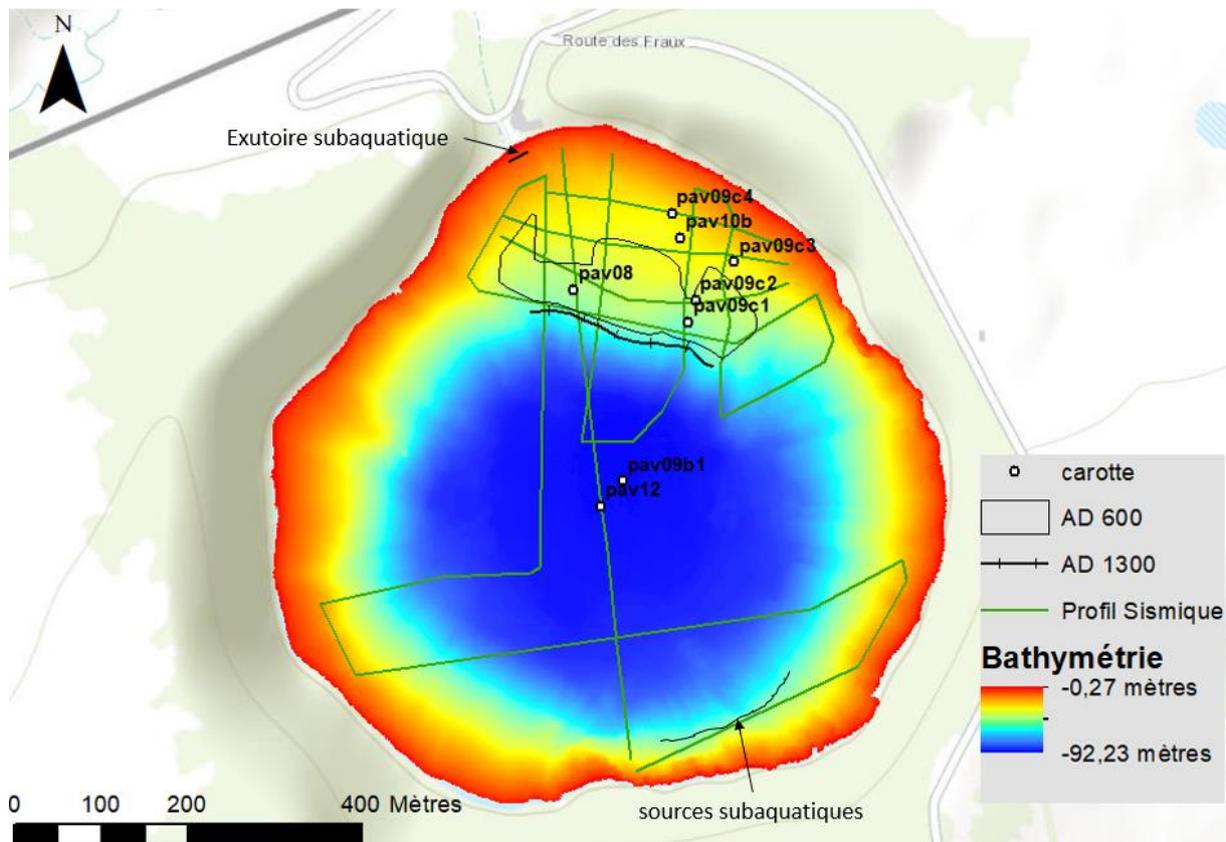


Figure 17 : Carte bathymétrique multifaisceaux du lac Pavin avec les carottes réalisées, les profils sismiques ainsi que les singularités subaquatiques du lac : les sources et l'exutoire subaérien, le slump AD 600 (trait noir) et a loupe de glissement d'AD 1300, d'après Chassiot et al., 2016.

Sur cette carte on remarque la présence d'un plateau subaquatique recouvert du slump provoqué par le tremblement de terre de AD600 qui a été associé à la d'une rupture du croissant pyroclastique faisant ainsi chuter le niveau du lac (Chapron et al., 2010, Chassiot et al., 2016 et 2018). L'évènement AD1300 correspond lui à une loupe d'arrachement d'un vaste glissement induit par un tremblement de terre (Chapron et al., 2010, Chassiot et al., 2016 et 2018). On remarque aussi la présence de sources subaquatiques qui s'explique par la géologie du site qui se compose d'un empilement de plusieurs coulées basaltiques et trachytiques provenant du Montchal et du Sancy (Glangeaut cité par Leyrit et al., 2016) créant un réseau favorable aux mouvements d'eau dans le sous-sol (Annexe 5). Le fait qu'il y ait aussi un exutoire subaquatique nous fait dire que le bilan hydrographique du lac est excédentaire puisqu'il se vide moins vite par l'exutoire qu'il ne se remplit par le ruissellement et les sources. Enfin, l'étude des nombreuses carottes sédimentaires a permis d'une part de dater le slump AD600 par datation au Carbon14 (Chassiot et al., 2016 et 2018) et d'autre part d'étudier le Trombe de 1785 détaillée par Meybeck (2019) et dont on retrouverait des traces par le dépôt de sédiments lacustres remaniés et riches en oxydes de fer (Arricau, 2019). Ces traces de l'éruption limnique

de 1785 se trouvent majoritairement sur ce plateau subaquatique (Annexe 6) et aussi dans le bassin en aval de canyons sous la forme ici d'une fine turbidite riche en oxyde de fer (Chapron et al, 2016 ; Chassiot et al, 2016).

2.2.2 Matériel et méthodologie

2.2.2.a Matériel

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.

Le procédé de sondage acoustique multifaisceaux (utilisé en 2008 pour la carte bathymétrique du lac Pavin) permet de mesurer depuis la surface la profondeur d'eau en plusieurs points simultanément. Il n'y a que trois lacs en France qui ont été étudiés par le biais de la bathymétrie multifaisceaux : le Léman, le lac du Bourget et le lac Pavin (Figure 18).

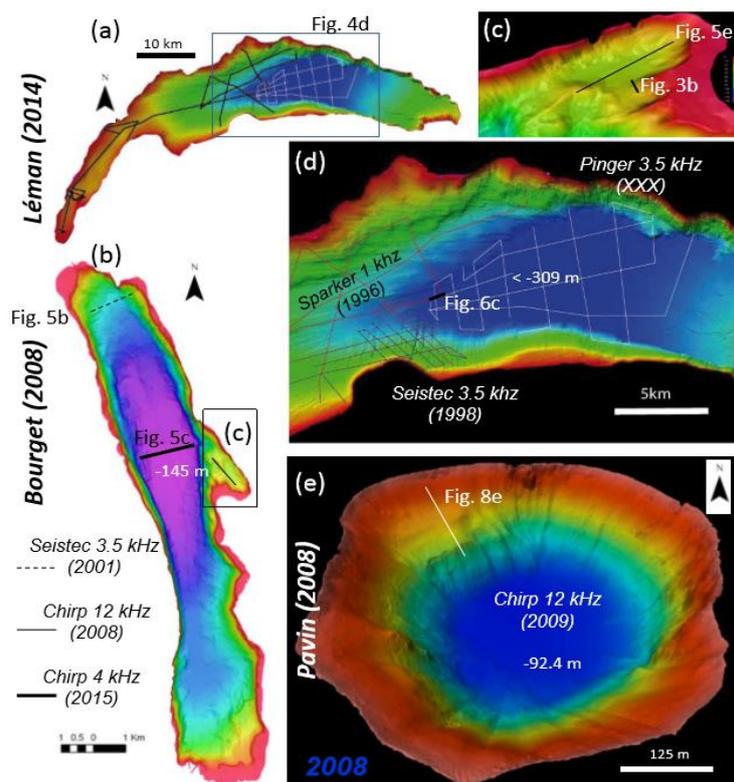


Figure 18 : Illustration des bathymétries multifaisceaux disponibles sur des lacs naturels profonds « français » avec le Léman (a et d), le Bourget (b et c) et le Pavin (e).

Le sondeur bathymétrique fonctionne à mesure que le navire se déplace, permettant ainsi de « balayer » le fond des océans (ou des lacs), sur une largeur pouvant aller jusqu'à 20 km par

5 000 m de fond (Figure 19 a). 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 (Anzidei et al., 2010). L'objectif du stage était initialement de compléter les données de la sismique réflexion « chirp » par l'usage de l'échosondeur 5 faisceaux HydroSurveyor (Figure 20 b) et ainsi comparer sa précision avec la bathymétrie de 2008.

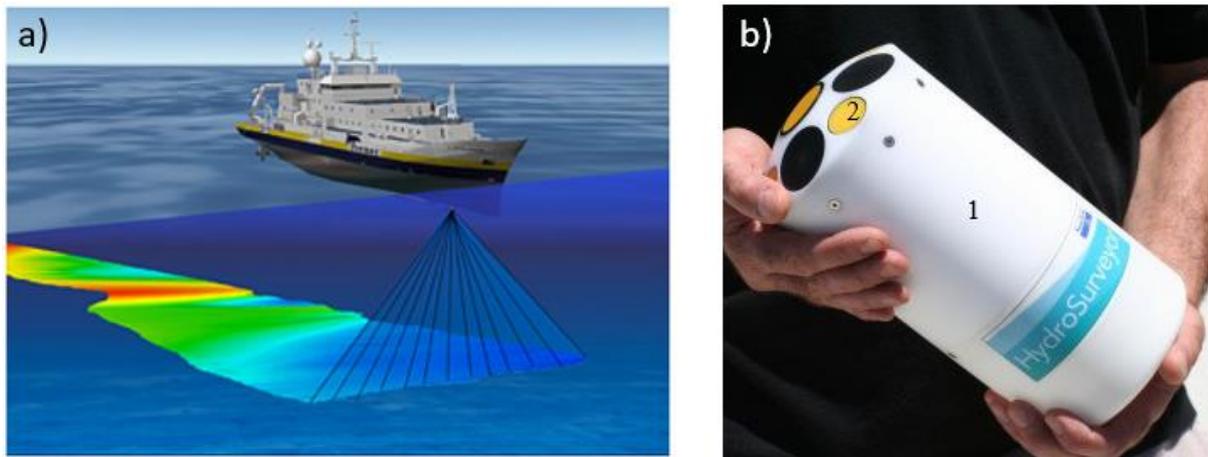


Figure 19 : a) Schéma d'une campagne de bathymétrie multifaisceaux (d'après le site IFREMER) ; b) Photographie du capteur HydroSurveyor cinq faisceaux 1- Capteur HydroSurveyor, 2- Emetteur/récepteur.

Le carottage profond du plateau (PAV08) fût localisé grâce aux données sismiques haute résolution (3,5 kHz) en limite du plateau subaquatique visible à proximité de l'exutoire (figure 17), ce travail a été réalisé en partenariat avec des chercheurs Belges du RCMG et français des laboratoires ISTO et EDYTEM. Une nouvelle campagne de données sismiques très haute résolution (12 kHz de type « Chirp », (Figure 12) en collaboration entre des scientifiques québécois et français (ISTO) a permis d'affiner les corrélations entre la sismique 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 (Figure 3)). Sur la carotte Pav08-P1 Chassiot a notamment identifié deux dépôts d'éruptions limniques historiques et corrélés à deux évènements historiques : en 1929 et en 1785 (Meybeck, 2019) à partir de la couleur des dépôts lacustres (annexe 6) et des datations C14, (Chassiot et al., 2016, 2018 et Arricau 2019). Sur les données « chirp » de 12 KHz on observe à -26 m de tranche d'eau le passage d'un faciès littoral

à un faciès diatomite (Figure 43) et on distingue localement des horizons remaniés vers la surface. C'est dans ce secteur qu'il serait nécessaire de densifier des profils 14 kHz et des carottages lors d'une future campagne.

2.2.2.b Préparation d'une campagne terrain pour étudier le remplissage sédimentaire des trois maars étudiés

L'une des premières missions que j'ai dû réaliser lors de mon stage fût la préparation de la mission terrain. Cette mission de terrain aura pour but de récolter des données manquantes afin d'affiner l'étude des lacs Pavin, d'Issarlès et de Tazenat. Cette étape antérieure au terrain se divise en deux temps, le premier correspond à l'étude des profils sismiques pour les maars de Tazenat et d'Issarlès, réalisés respectivement en mai 2017 et Juin 2019, afin de voir les emplacements où le carottage est pertinent ; le second temps de ce travail préparatoire est la réalisation de fonds de carte qui vont être importés dans le logiciel Hypack afin de faciliter la navigation et la prise de nouvelles données acoustiques et sédimentaires sur le terrain.

La première étape de la préparation de la mission de terrain est donc l'étude des données de sismique réflexion précédemment acquises. Une fois les profils récupérés on utilise le logiciel EDIFISegy qui permet d'importer des profils sismiques géolocalisés afin de les visualiser et de tracer les horizons clés profil par profil. Une fois ces horizons tracés, il est possible de les exporter en shape file afin de les utiliser dans ArcMap. L'utilité de les exporter sur ArcMap est qu'il est ainsi possible de les intégrer aux fonds de cartes utilisés pour la navigation lors de l'acquisition de nouvelles données. Cependant, ici c'est la partie visualisation des profils sismiques qui est intéressante puisqu'elle nous permet de géolocaliser l'endroit où l'on veut carotter (Figure 13).

Après l'étude des profils sismiques et la définition des nouveaux points de carottage il faut faire la carte qui servira à la navigation. Cette carte comportera la bathymétrie du lac (la bathymétrie de Delebecque de 1898 (Figure 8) pour les maars d'Issarlès et de Tazenat et la carte bathymétrique multifaisceaux pour le maar Pavin de 2008 (Figure 17), les profils sismiques déjà réalisés lors de précédentes campagnes, obtenus grâce à EDIFISegy et enfin les carottes déjà réalisées ainsi que les futurs points de carottages. Pour réaliser ces cartes il faut tout d'abord importer et géoréférencer les cartes anciennes de Delebecque pour les digitaliser. Après cela on importe les données citées précédemment, il est à noter que l'on rajoute quatre points (nommés 1, 2, 3 et 4) dont on relève les coordonnées afin de pouvoir plus aisément géoréférencer ces fonds de cartes sur le logiciel de navigation Hypack (Figures 33, 34 et 35). En effet, le logiciel

Hypack ne peut importer les fonds de cartes qu'au format image .tiff demandant une exportation spécifique sur ArcMap.

Pour importer des fonds de carte sur le logiciel Hypack il faut aller dans l'onglet *Image* puis *Load*. Dans cette nouvelle fenêtre on clique sur l'un des quatre points à géoréférencer puis sur le bouton *Add GCP*. Une fois deux des quatre points géoréférencés il ne reste plus qu'à lancer le géoréférencement du fond de carte avec l'icône *Two points transformation*. Une fois le fond de carte géoréférencé on revient sur la fenêtre principale de Hypack et sur le manager de fichier de gauche on ouvre *Projet item* puis *Background files* pour charger le fond de carte. Les fonds de carte comportent quatre points pour les géoréférencer au lieu de deux afin d'être plus précis si le géoréférencement en deux points ne marche pas, évitant ainsi de devoir chercher de nouvelles coordonnées et limiter ainsi les allers et retours entre les divers logiciels.

Pour le lac Pavin il faudrait obtenir des profils sismiques plus rapprochés sur le plateau et sur le littoral afin de pouvoir délimiter au mieux la géométrie des divers faciès (littoraux, MWDs et dépôt d'éruption limnique (Figure 17)) et cibler un transect de carottes sédimentaires afin d'étudier la répartition du faciès littoral dans le temps et dans l'espace selon la variation du plan d'eau (Figure 43). Pour le maar d'Issarlès la mission terrain aura pour objectif de préciser sur les pentes la bathymétrie de Delebecque de 1898 (Figure 8) ainsi que de prélever des carottes sédimentaires sur le fond du bassin et les rives pour étudier le remplissage sédimentaire et dater les remaniements gravitaires qui n'ont pas pu l'être (Figure 13). Enfin pour le gour de Tazenat si le temps sur le terrain le permet il faudrait faire une étude bathymétrie afin d'affiner, tout comme pour Issarlès, la bathymétrie réalisée par Delebecque de 1898 (Figure 8).

2.3 Le gour de Tazenat

2.3.1 Site du gour de Tazenat



Figure 20 : Carte IGN des alentours du gour de Tazenat et localisation de la zone couverte avec un LIDAR illustré dans la Figure 21.

La particularité du gour de Tazenat réside dans le fait qu'il possède un exutoire avec la Morge et un delta formé par le ruisseau de Rochegude contrairement aux deux autres lacs étudiés qui n'ont pas de telles formations aussi visibles. Les abords du lacs sont fortement

anthropisés par l'agriculture avec au niveau de l'étang de Rohegude des fermes au lieu-dit des Forges.

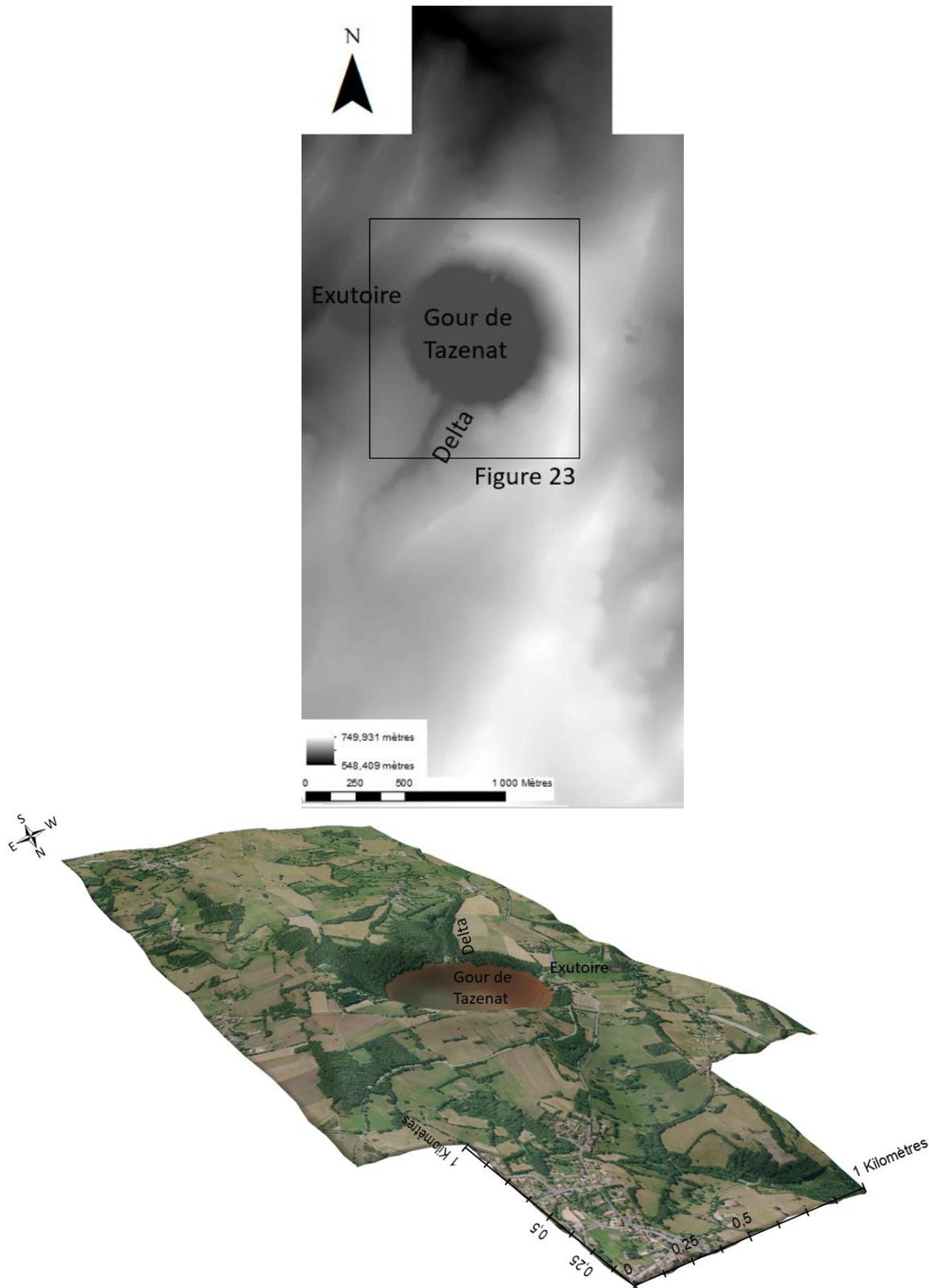


Figure 21 : Illustration des données Lidar de la zone du gour de Tazenat et modèle 3D du secteur.

Le lidar met en exergue l'incision du delta par le tributaire (Figure 22). Cette incision fait plus de 12 mètres selon Juvigné et al., (1998) (On voit aussi très bien que le croissant pyroclastique est plus élevé sur la moitié est du lac et qu'il est absent aux alentours de l'exutoire

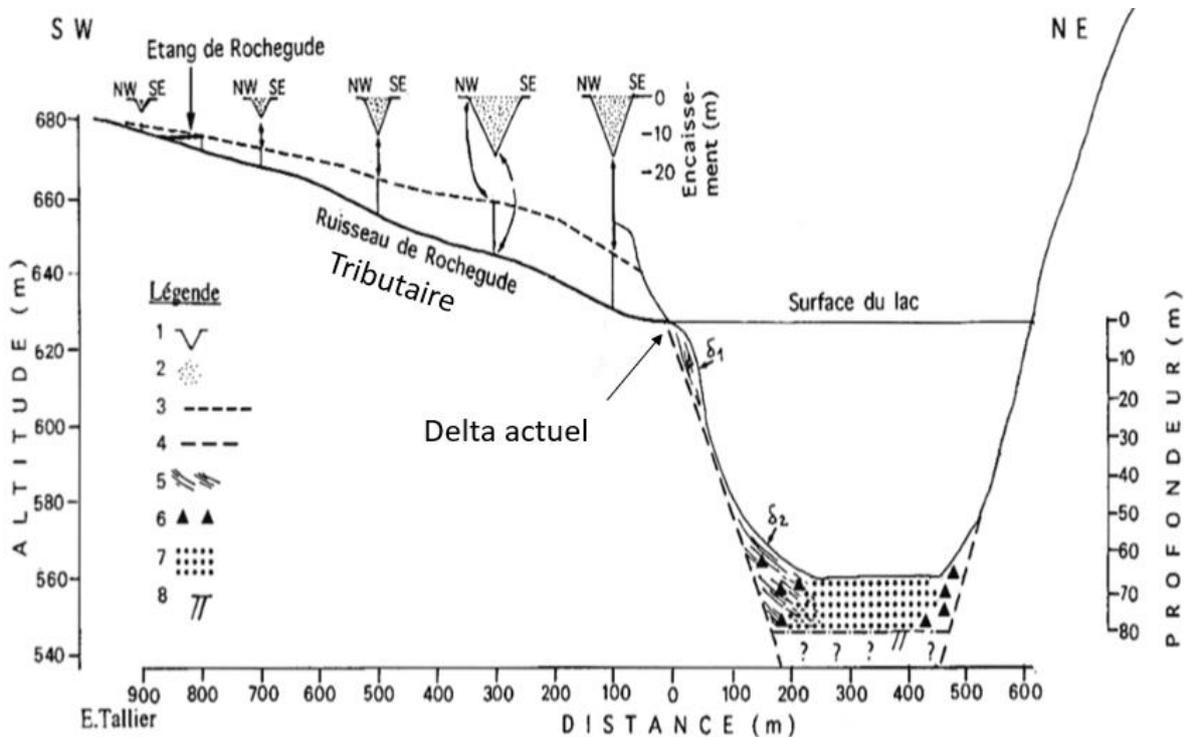


Figure 22 : Profil du vallon de Rohegude et du Gour de Tazenat selon Juvigné et Stach-Czerniak, et al. 1998. : 1 – Profil transversal du vallon de Rohegude, 2 – Matériaux pyroclastique enlevés par reprise d'érosion, 3 – Profil longitudinal du sommet du versant du vallon, 4 – Profil supposé de la roche en place sous les dépôts lacustres, 5 – Dépôts deltaïques, 6 – Dépôts de pente, 7 – Vase, 8 – Base de la vase. Sur cette figure on distingue clairement le delta actuel de Rohegude en bordure du lac et on devine un paléo delta perché à plus de 12 m au-dessus du niveau du lac.

On remarque des replats aux alentours de 640 mètres de part et d'autre du delta actuel laissant supposer que l'ancien niveau du gour de Tazenat devait se situer à cette altitude (Juvigné et Stach-Czerniak, et al. 1998 (Figure 22)). Le site a été étudié en couplant palynologie et sédimentologie pour faire état d'une intense activité humaine au cours du Néolithique final. Cela corrobore avec la présence de monuments mégalithiques dans les Combrailles où de données archéologiques telle que la découverte dans l'exutoire du gour de Tazenat d'une hache de pierre polie typique de cette période constituant plusieurs indices de défrichement au Néolithique final (Juvigné et Stach-Czerniak, et al. 1998).

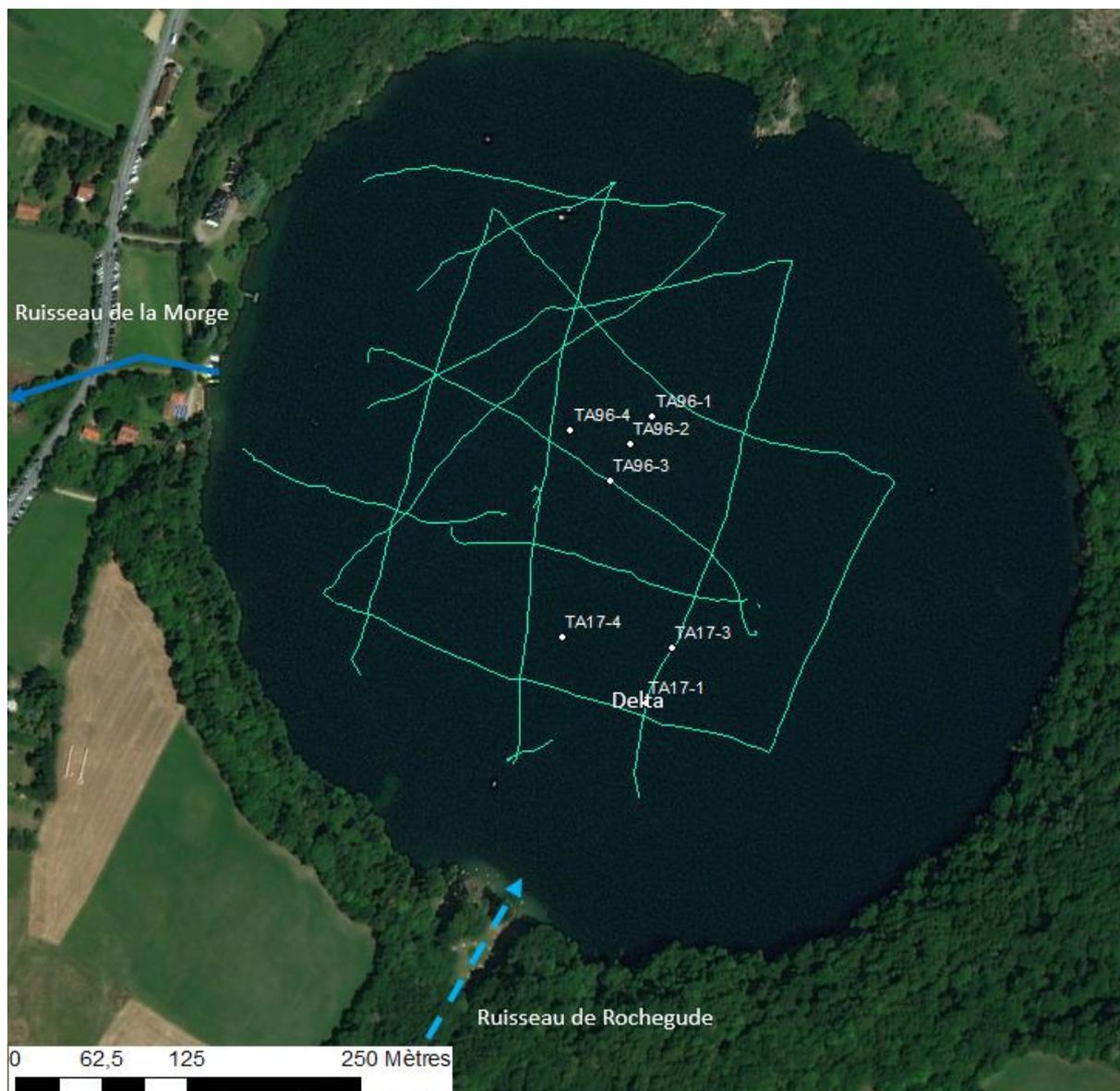
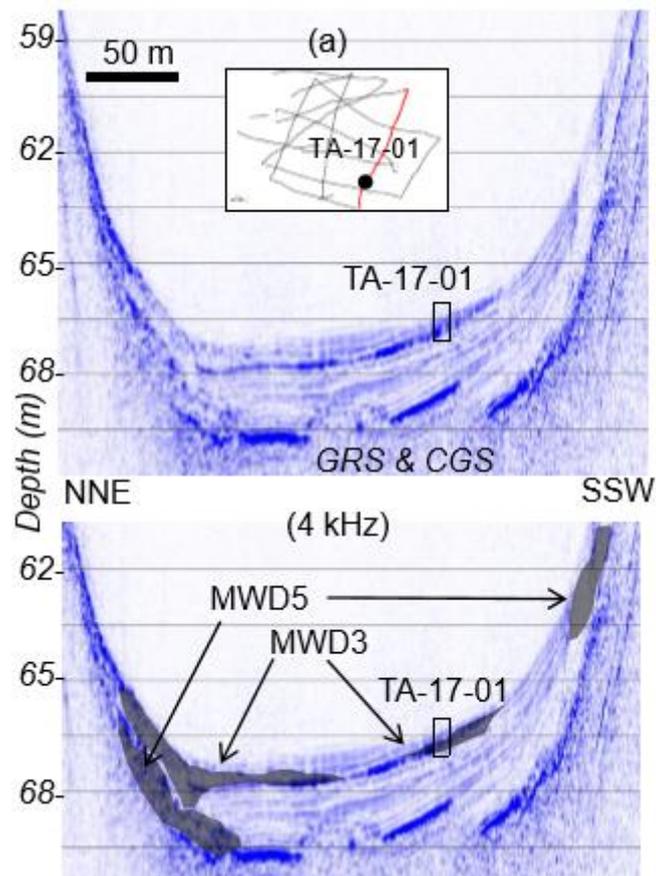


Figure 23 : Photographie aérienne du gour de Tazenat avec l'emplacement du delta, de l'exutoire incisé de 12 mètres, du ruisseau de Rochegude, des profils sismique (trait cyan) et des carottes sédimentaires collectées en 2017.

2.3.2 Matériels et méthodes

Le gour de Tazenat est couvert par une bathymétrie complète de Delebecque de 1898 (Figure 8) ainsi que par 45 profils sismiques en 4kHz (9 profils), 14 kHz (14 profils) et 200 kHz (23 profils) réalisés en mai 2017 (Figure 23) qui s'est accompagné du prélèvement de trois carottes sédimentaires en juin 2017 (TA17-1, TA17-3, TA17-4). On remarque que comme pour le maar d'Issarlès on trouve de nombreux dépôts de glissements de masse montrant l'instabilité des dépôts, aériens ou subaquatiques (Figure 13). Même si on ne voit que les trois premiers mètres de sédiments à cause d'une trop forte teneur en gaz plus en profondeur qui absorbe le signal acoustique, on peut étudier les sédiments profond grâce à la carotte TA-96 (Annexe 7)

prélevée sur le fond plat du lac. Ce remplissage consiste en des vases allant du noir olive (sur le bas de la carotte) à noir brunâtre (vers le haut de cette dernière) (Juvigné et Stach-Czerniak, et al. 1998).



3 – Résultats

3.1 Lecture des cartes des pentes

On présentera ici, en premier lieu la lecture des cartes des pentes (qui sont des résultats du traitement géomatiques) afin de finir la présentation de ces sites. On ne présente que les sites de Pavin et de Tazenat puisque ce sont les deux seuls sites où le Lidar est disponible.

3.1.1 Lac Pavin

Pour étudier de façon précise la géomorphologie du lac Pavin et comprendre son histoire on utilise une carte des pentes obtenue à partir du Lidar fusionné à la bathymétrie multifaisceaux (Figure 16).

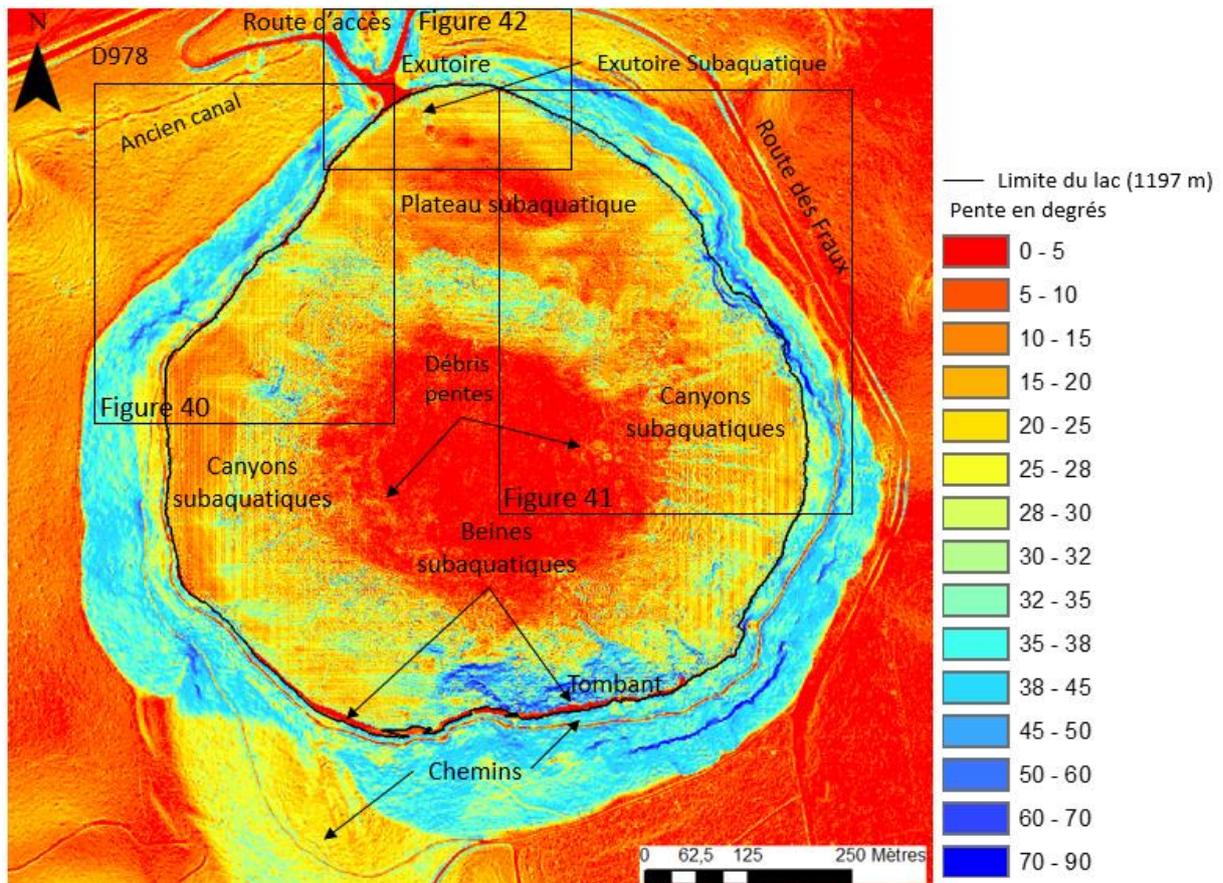


Figure 25 : Carte des pentes en degrés obtenue à partir du Lidar du lac Pavin avec en noir le niveau 0 du lac à 1197 mètres d'altitude.

La carte des pentes du lac Pavin (Figure 25) couple à la fois la topographie du lac et sa bathymétrie. On remarque que la zone hors du cratère est relativement plane (avec des pentes inférieures à 20 degrés) excepté pour la partie Nord avec l'exutoire. On note la présence d'une route : Route des Fraux à l'Est. Enfin la zone Sud est la plus pentue puisqu'elle prend place sur le flanc du volcan du Montchal. L'exutoire au Nord est fortement anthropisé comme le témoigne les routes d'accès planes qui contraste avec les pentes relativement fortes (supérieures à 35 degrés) qui donnent accès à la D978. La dernière trace d'anthropisation des abords du

cratère du Pavin est le canal d'irrigation qui a servi de 1750 à 1859 (Miallier et al., 2020) qui est visible à l'Ouest de l'exutoire et qui est symbolisé par le liseré rouge (Annexe 8).

Les contours du cratère du lac Pavin sont homogènes ; hormis à l'Est et au Sud-Est où l'on remarque des traits bleu roi qui correspondent à de fortes pentes qui sont des manifestations d'anciens glissement de terrain datant de 1896 pour celui au Sud-Est (Chapron et al., en préparation). Le tour du lac Pavin est accompagné de deux chemins reconnaissables par leur forme filiforme et de teinte rouge (pentes de moins de 15 degrés). Enfin on remarque deux curiosités à l'exutoire : tout d'abord une bande jaune qui s'étend vers l'Est peu pentues (une vingtaine de degrés) et à l'Ouest de l'exutoire une zone totalement plane car il est totalement anthropisé et ce dès la fin du XIX^{ème} siècle (Annexe 9).

L'avantage de cette carte des pentes est la possibilité d'étudier le littoral subaquatique qui au Sud montre deux bandes rouge (planes) qui sont les beines actuelles du Pavin avec à l'Est un tombant prononcé. Ces beines subaquatiques sont à l'emplacement des sources subaquatique (environ 60 mètres de fond (Chapron et al., 2016 et Chassiot et al., 2016 et 2018)) sur la falaise rocheuse qui s'appuie sur le volcan du Montchal. Si l'on continue la lecture de cette carte en remontant vers le Nord on remarque de part et d'autre du lac des canyons subaquatiques qui permettent l'apport de sédiments des flancs et du plateau subaquatique vers le fond du lac (Arricau, 2019 (Annexe 6)). On voit que ces canyons sont présents là où les pentes aériennes sont plus fortes ce qui permet de faire tomber plus de matériels creusant ainsi ces canyons. Au pied de ces canyons on retrouve les matériaux remaniés sous forme de tâche jaune montrant l'irrégularité du fond du lac en ces points. Enfin la levée bathymétrique montre au Nord un plateau subaquatique avec un exutoire subaquatique à 26 mètres de fond. La présence de cet exutoire subaquatique montre que les apports d'eau du lac sont supérieurs à la quantité qui s'en écoule mais dans un contexte de réchauffement climatique il faut prendre en compte que sans un apport en eau suffisant le niveau du lac pourrait chuter de 26 mètres.

L'absence de niveau plat sur le contour submergé du lac montre que ce dernier n'a jamais eu de paléobeine inférieure à son niveau actuel (contrairement au lac Albano, Anzidei et al., 2020). Le niveau actuel du lac est donc de facto le niveau le plus bas qu'ait connu le lac.

3.1.2 Gour de Tazenat

Comme pour le lac Pavin pour pouvoir comprendre cette zone il faut passer par une carte des pentes.

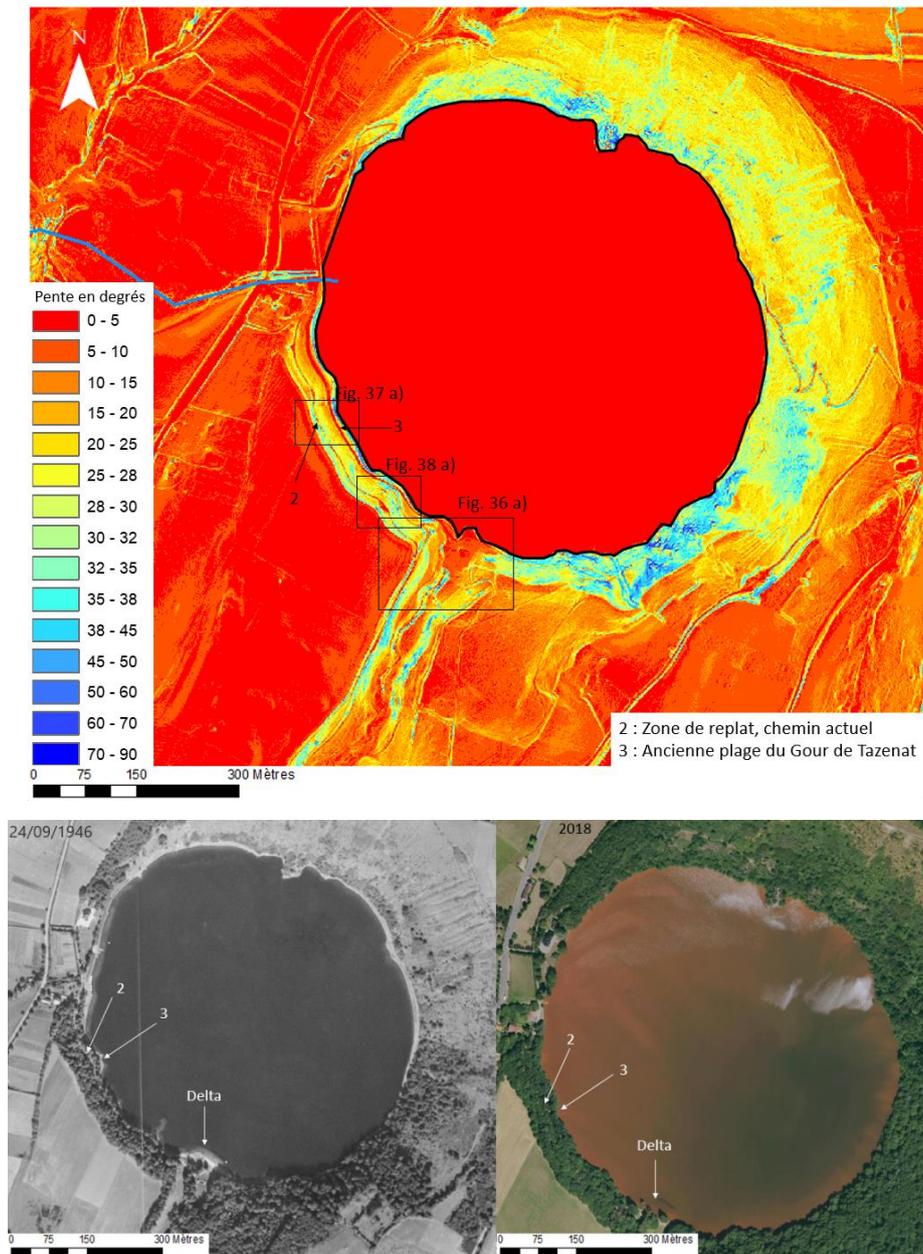


Figure 26 Illustration des éléments géomorphologiques du Gour du Tazenat. (a) : Carte des pentes du cratère du Gour de Tazenat en degrés obtenue à partir du Lidar avec en noir le niveau 0 du lac à 330 mètres d'altitude où l'on trouve le delta du lac) composé d'un pallier et de zones composées de deux replats correspondants à un chemin à 644 mètres (illustré sur les Fig. 38 a et Fig. 37 a) (2) et à l'ancienne plage de Tazenat (3). (b) : Photographie aérienne de 1946 montrant la présence du chemin (2) et la présence quasi-continue d'une plage le long du Gour de Tazenat (3) et (c) : Photographie aérienne de 2018 du Gour de Tazenat montrant la disparition de la plage sous une strate arborée. On remarque aussi l'augmentation de la strate arborée ainsi que la présence de cyanobactérie qui teinte l'eau de rouge et ce depuis l'été 2016.

Sur cette carte des pentes en degrés (Figure 26) on remarque à l'Ouest du lac une zone plane (rouge et orange) dont la pente est inférieure à 15 degrés avec la présence de la

départementale 19 nommée *Les Héros* sur la carte IGN (couloir uniformément rouge avec les limites en jaune). Au Sud du cratère on remarque le delta du ruisseau de la Rochegude et du Gour de Tazenat qui se découpe en pente raide dans un premier temps (50 à 30 degrés) puis les pentes s'adoucissent (28 degrés à 15 degrés) et enfin au fond de ce delta on trouve une rigole fortement pentue (pouvant aller jusqu'à 90 degrés). A l'Est du delta on remarque un espace semblable à la zone Ouest du lac avec des zones ayant une pente maximale de 20 degrés, avec cependant une route ou un chemin près de fortes pentes (45 à 90 degrés), qui sont certainement le résultat de l'aménagement de la route du Champs du fer. Pour ce qui est du cratère en lui-même on remarque qu'il a une forme de croissant de lune qui ne se ferme pas à l'Ouest et est plus épais à l'Est. La partie allant du Nord-Ouest au Sud-Est possède des pentes homogènes qui sont de plus en plus raides à mesure que l'on se rapproche du lac (commençant avec un dénivelé de 5 degrés au sommet pour se terminer par des pentes de 50 degrés aux bords du lac). On note trois singularités : tout d'abord la présence d'une avancé très pentues dans le lac, des canaux d'érosion avec une pente d'une trentaine de degrés, certainement dû à la déforestation visible sur la photographie aérienne de 1947 (Figure 26 b) et enfin un chemin zigzagant du sommet au lac qui comme les autres est visible par son liseré rouge qui tranche avec la gamme jaune de cette partie du cratère. La partie Sud-Est est quant à elle la zone la plus pentue du cratère avec des pentes supérieure à 35 degrés. Enfin, la partie Sud-Ouest possède des pentes importantes dès le sommet (30 à 38 degrés) puis elle comporte un replat (Figure 26 a, 38 b et 37 b), suivi de pentes plus faibles se terminant par un second replat (Figure 26 a et 37 b), avant de se jeter dans le Gour de Tazenat avec de fortes pentes (de 50 à 90 degrés). Le premier replat correspond à un chemin de randonnée faisant le tour du lac et se situant environ à 644 mètres d'altitude, et le second correspond à une étendue de sable sur la photo aérienne de 1946. On note que cette dernière a disparu sur les photographies aériennes actuelle au profit d'une strate arborée importante, ces dernières permettent de voir l'impact du bloom de cyanobactérie rendant le lac rouge depuis l'été 2016 (Figure 26).

3.2 Bassin versant

Nous allons nous baser sur les blocs 3D et cartes des pentes précédemment réalisés pour déterminer le bassin versant de nos trois lacs volcaniques. Cependant comme chaque système lacustre a une identité propre les méthodes divergeront légèrement.

3.2.1 Bassin versant d'Issarlès

Pour délimiter le bassin versant d'Issarlès on commence par faire une carte des pentes (slope map) de la zone autour du lac d'Issarlès avec la fonction *Pente de Raster - Surface* dans *3D Analyst*. Une fois cette carte des pentes créée on peut commencer par délimiter le bassin versant du maar d'Issarlès et l'on croise ces informations avec le réseau hydrographique. Cependant comme ce lac est relié à trois barrages son bassin versant se trouve modifié par l'Humain. On obtient donc différents bassins versants en fonction du temps. Le premier est le bassin naturel du lac d'Issarlès, c'est-à-dire sans l'implication des barrages donc avant 1954 faisant 3,4 km² (Figure 27).

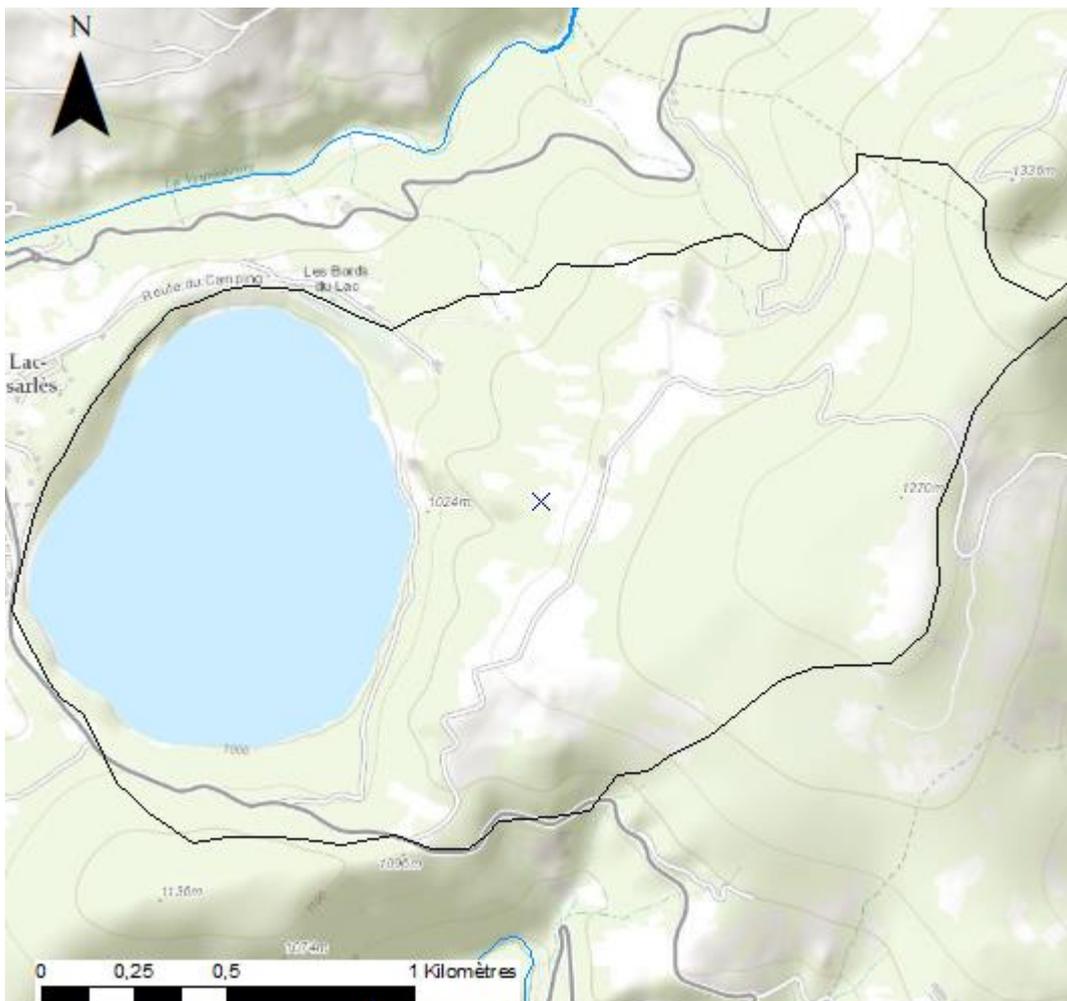


Figure 27 : Limites du bassin versant topographique naturel du lac d'Issarlès.

Le second bassin versant (Figure 28) s'étend de la fin des travaux EDF avec la construction des barrages de la Palisse et de la Veyradeyre en 1954 à la construction du barrage du Gage en 1967. La construction de ces barrages est primordiale dans la compréhension du bassin versant du lac d'Issarlès puisque celui de la Veyradeyre est en amont du lac et les deux autres, en aval, sont utilisés pour envoyer de l'eau au lac d'Issarlès afin de maintenir son niveau d'eau (Jourde et al., 2015) (annexe 2).

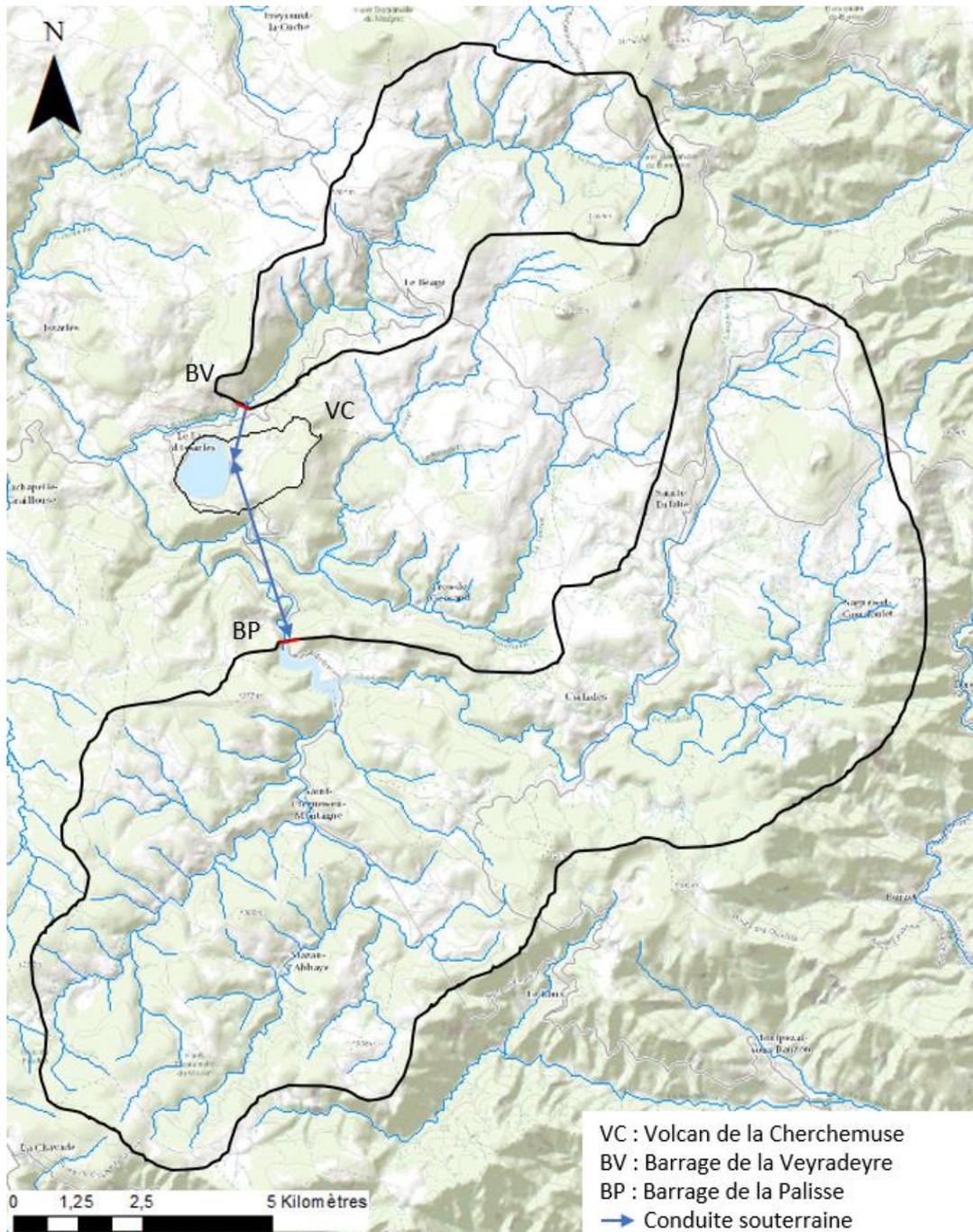


Figure 28 : Evolution des limites des bassins versants anthropisés du lac d'Issarlès c entre 1954 (au Nord-Est du lac) et 1967 (au Sud-Est du lac).

Le troisième bassin du lac est le bassin versant actuel et fait suite à la mise en eau du barrage du Gage en 1967 (Jourde et al. 2015). Le bassin versant hydrologique actuel du maar d'Issarlès fait 215,4 km² soit plus de 65 fois la taille du bassin versant naturel d'Issarlès (Figure 29).

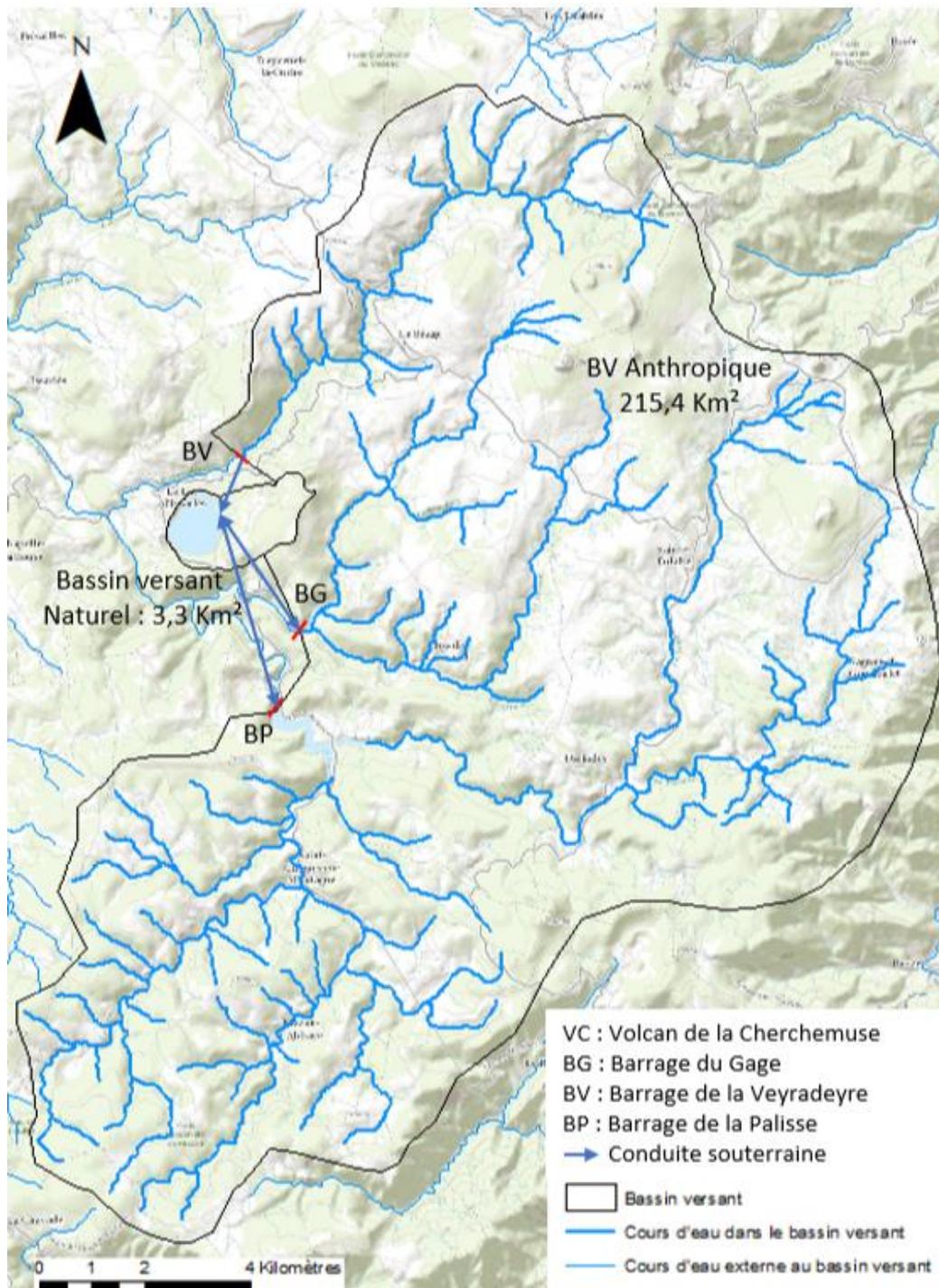


Figure 29 : Limites du bassin versant du lac d'Issarlès depuis 1967.

La géomorphologie faillée due au contexte volcanique des environs du lac d'Issarlès pose la question de la définition du bassin versant hydrologique relatif au lac d'Issarlès. À cela s'ajoute la présence de sources souterraines citées précédemment impliquant de facto une arrivée d'eau ne dépendant pas de la topographie et donc du ruissellement (Jourde et al, 2015, Coûteaux, 1984).

3.2.2 Bassin versant du lac Pavin

Puisque le Pavin a des sources subaquatiques (Figure 3), son bassin versant topographique ne correspond pas exactement à son bassin versant hydrologique (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 hydrologique, nous avons compilé les données MNT de l'IGN d'une résolution d'un mètre avec les données bathymétriques. La topographie atypique du lieu permet de définir le bassin versant topographique qui correspond au croissant pyroclastique (Chassiot et al., 2018).

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. Ce site qui est une grotte volcanique sous une coulée de lave dont le niveau est lié à celui du Pavin (Meybeck, 2016). Cette liaison est visible par le niveau de l'eau qui est égale aux deux sites (Annexe 5). 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. 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) ainsi que la présence du Puy de Pertuyzat. À cela s'ajoute le

lac 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 30).

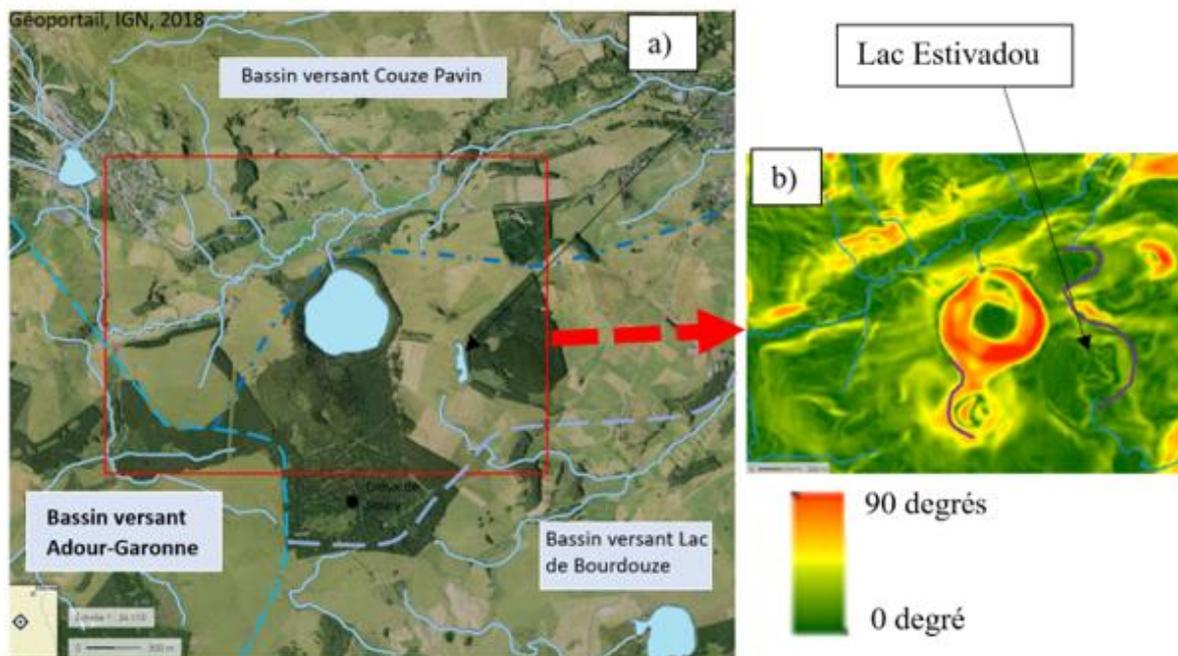


Figure 30 : Illustration des différents réseaux hydrographiques aux alentours du lac Pavin(a) et de la carte des pentes qui jouxent le lac (b), d'après Arricau (2019).

Le bassin versant (Figure 31) qui vient d'être défini concorde relativement bien avec celui proposé par le Contrat territorial de la Couze Pavin de 2017 (Annexe 10) établi par le parc naturel régional des volcans d'Auvergne qui a pour but de protéger quatre lacs, dont le lac Pavin. 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. 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.

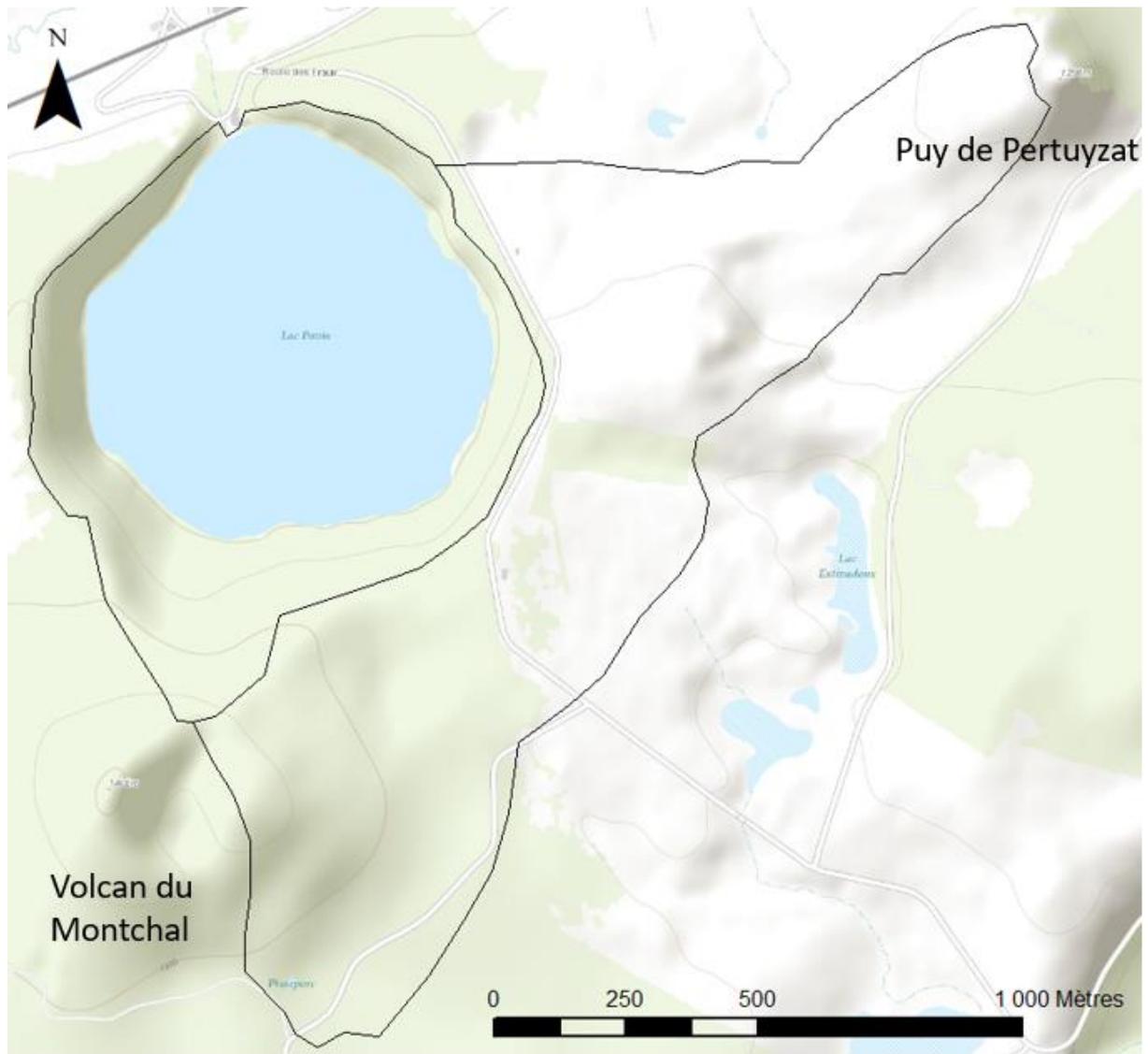


Figure 31 : Carte du Bassin versant topographique et hydrologique du lac Pavin.

3.2.3 Bassin versant du gour de Tazenat

Le bassin versant topographique de Tazenat est assez facilement délimitable puisqu'il se compose du croissant pyroclastique ainsi que des eaux captées par le ruisseau du Rohegude (Figure 32).

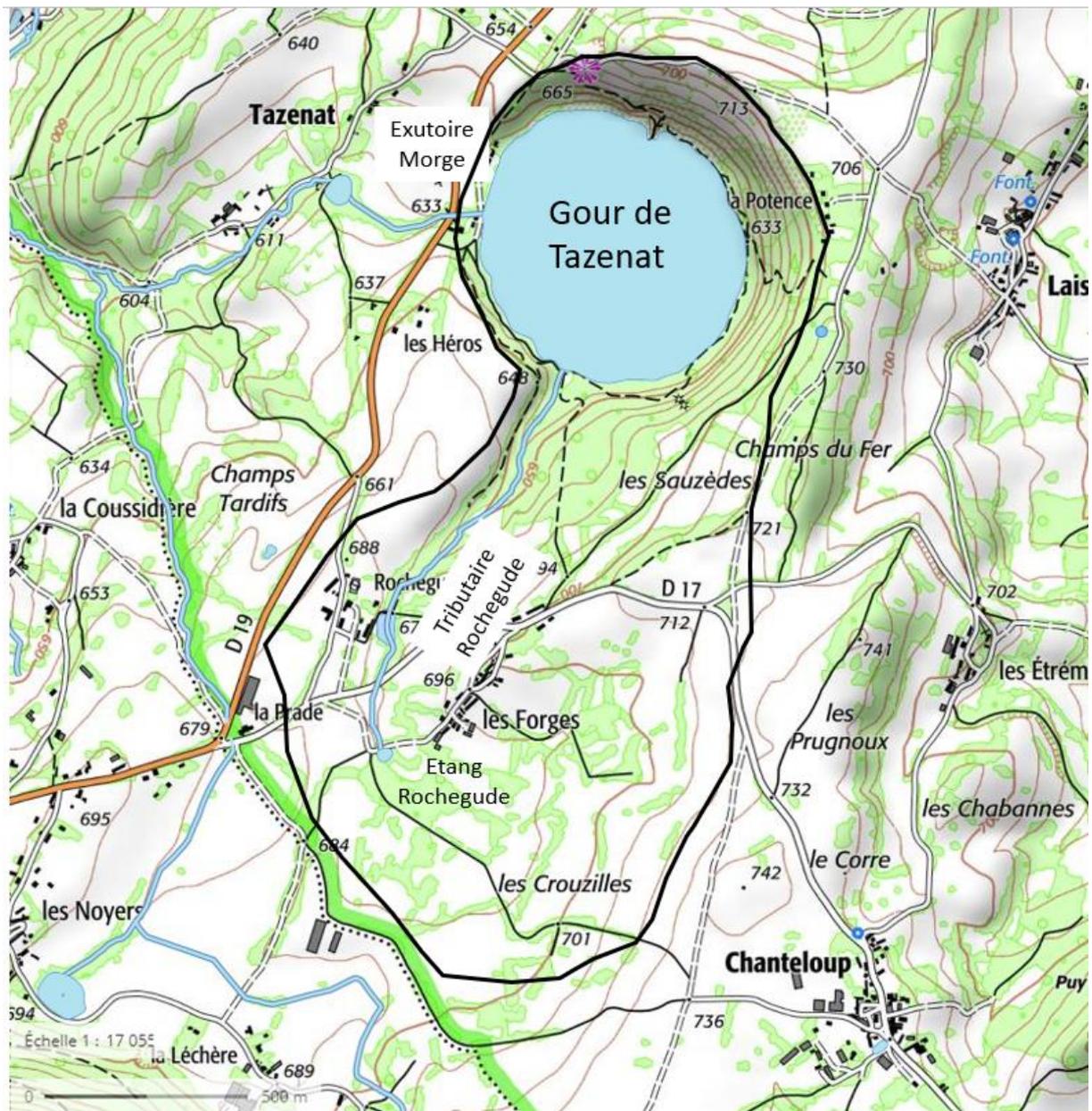


Figure 32 : Bassin versant topographique du lac d'Issarlès.

Cependant le contexte volcanique et la présence de faille (Valentine et al., 2019) suggère que les bassins versants topographique et hydrologique sont différents et donc, tout comme pour Issarlès, ne peuvent être définis par cette méthode de délimitation ex-situ.

3.3 Carte de navigation et présentation de potentiels déroulés de missions de terrain

Les trois cartes de navigation (Figures 33, 34 et 35) ci-dessous mettent en exergue les données à récolter sur chacun des sites étudiés.

Tout d'abord pour le site du Gour de Tazenat est le site que nous allons le moins étudier sur le terrain en raison des données que l'on possède déjà (carottes Ta17-1, Ta17-3 et Ta17-4) ainsi que les nombreuses lignes de sismique réflexion. L'objectif ici serait de faire un maillage plus serré de ces profils afin d'obtenir une bathymétrie précise et complète du Gour de Tazenat qui pourrait affiner la bathymétrie de Delebecque de 1898 (Figure 8) mais aussi la comparer avec les outils dont on dispose aujourd'hui. Cette campagne (Figure 33) de levé bathymétrique se ferait avec le sondeur Hydro Surveyor qui permet d'obtenir une bathymétrie multifaisceaux jusqu'à 60 mètres de fond puisqu' au-delà de cette profondeur le capteur Hydrosurveyor ne produit qu'une bathymétrie monofaisceau. Ce capteur faisant aussi courantomètre (système de type ADCP) on pourrait également rechercher la présence et l'emplacement des sources subaquatiques documentées par Juvigné et al, (1998). Le second objectif de cette campagne est la prise de nouvelles longues carottes à proximité des carottes de 1996, pour étudier l'histoire des cyanobactéries dans ce lac (projet PALEOBLOOM).

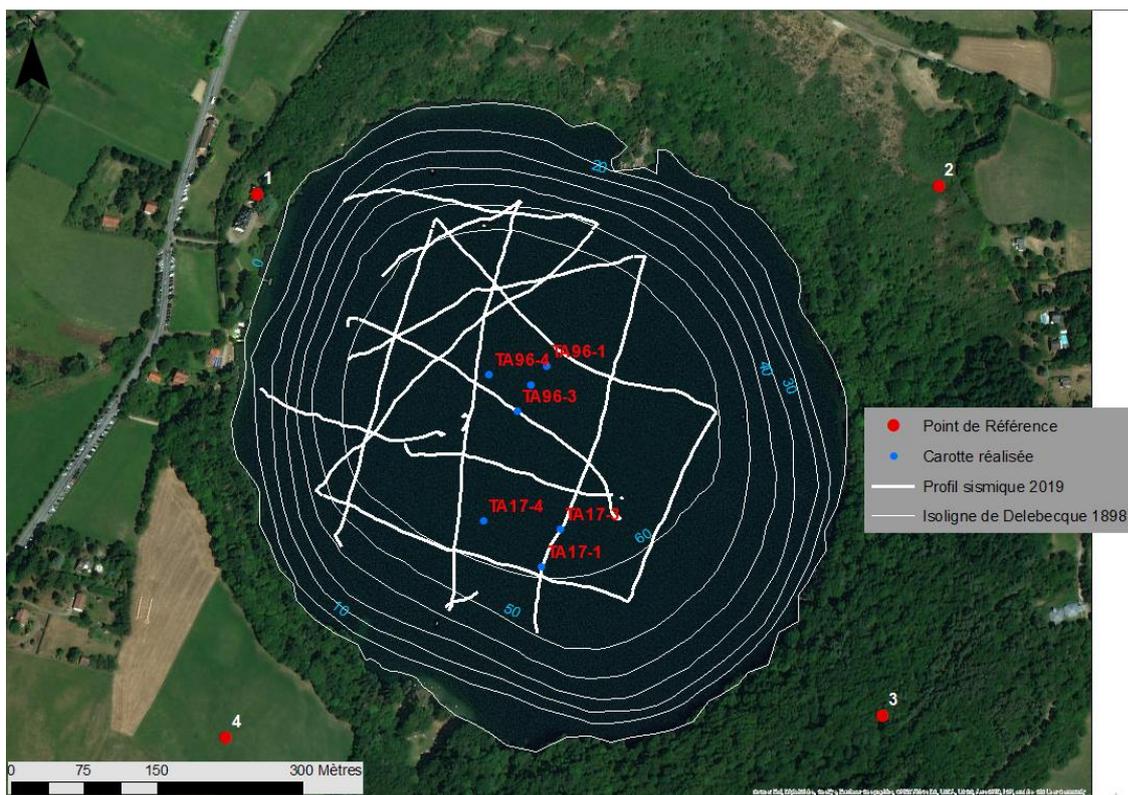


Figure 33 : Carte de navigation du lac Tazenat avec en blanc les profils sismiques et la bathymétrie, les points bleus sont les carottages déjà fait et enfin les points rouges correspondent aux points de géoréférencement.

Le second site étudié est le maar Pavin (Figure 34). L'objectif sera ici de réaliser une nouvelle carte bathymétrique du plateau du Pavin avec le capteur Hydrosurveyor récemment acquis au laboratoire GEODE afin de tester ses performances par rapport au sondeur utilisé en

2008. D'autre part il serait pertinent de faire un transect de carottage sur le plateau afin de pouvoir étudier l'évolution du profil littoral qui se trouve de 0 mètres à 26 mètres de fond. Un transect de carottes permettrait d'obtenir une vision précise de l'évolution du faciès littoral au cours du temps. Il serait aussi pertinent de faire des carottages sur la partie Est du plateau afin de préciser la géométrie des dépôts d'éruption limnique présents sur ce dernier (Arricau, 2019).

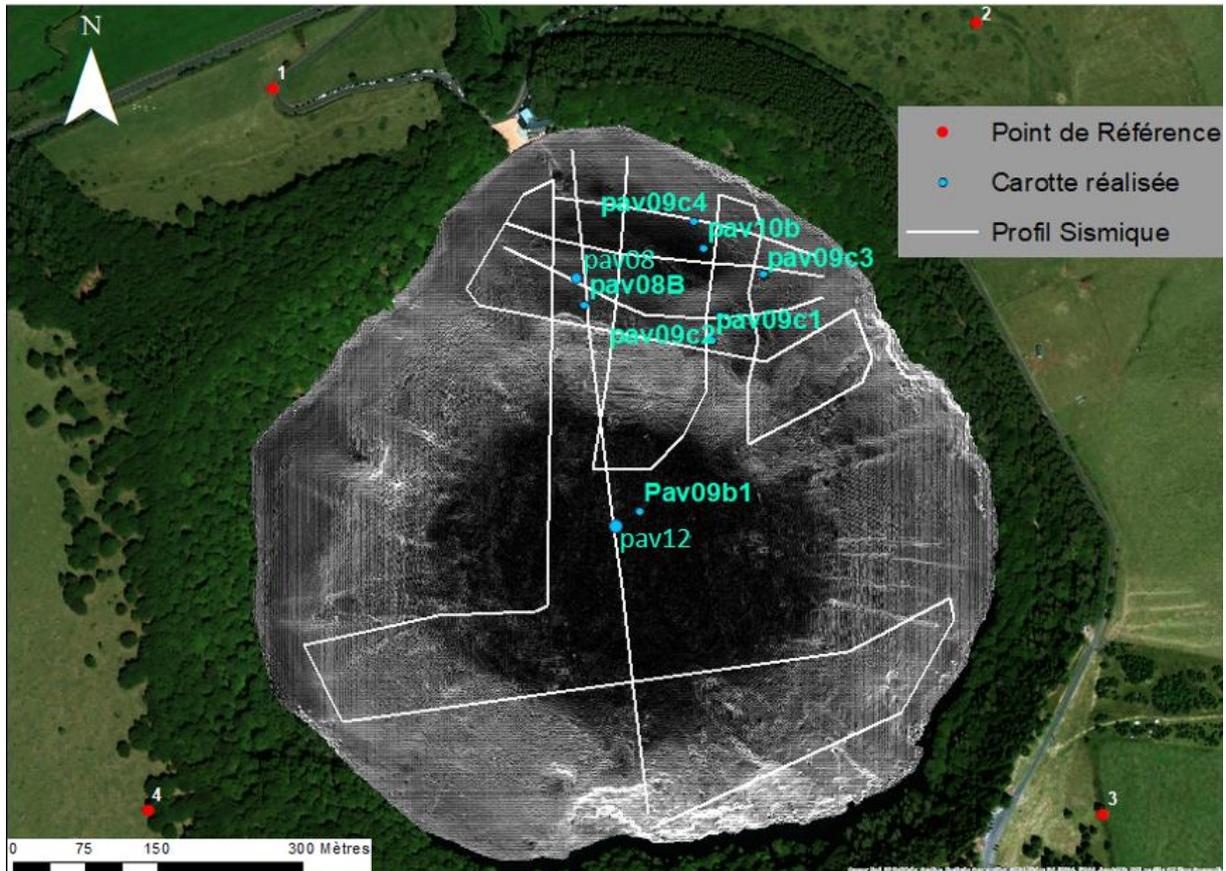
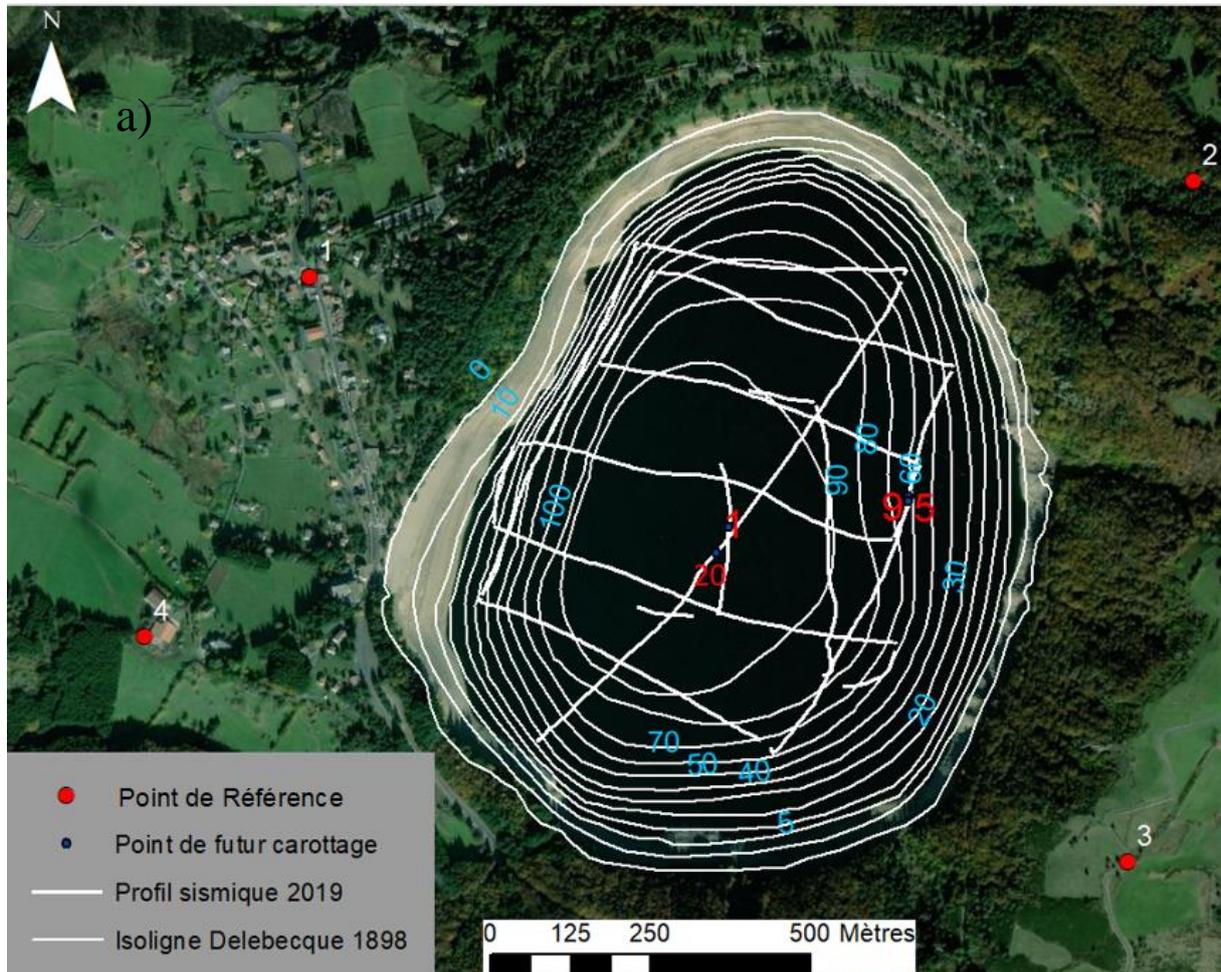


Figure 34 : Carte de navigation du lac Pavin avec en blanc les profils sismiques réalisés, les points bleus sont les carottes déjà réalisées et enfin les points rouges correspondent aux points de géoréférencement.

Enfin le lac d'Issarlès (Figure 35) possède les mêmes problématiques que le site du Gour de Tazenat, c'est-à-dire une bathymétrie peu précise. Sur ce site on souhaite réaliser une bathymétrie fine à l'aide du sondeur Hydro Surveyor en tenant compte du marnage ou en tout cas de la différence entre le point zéro de la bathymétrie de 1898 de Delebecque (Figure 13) et le niveau du lac différent sur la carte de navigation (Figure 35). À cela s'ajoute une campagne de carottage en 4 points de carotte de 3 mètres (Figure 35). L'emplacement de ces carottes a été choisi suite à l'étude des profils sismiques de la campagne de 2019. Ces sites de carottages se situent aux endroits où un maximum de turbidites se superposent (Figure 13). Les points de carottages situés sur les profils 1 et 20 sont à une profondeur de 108 mètres sous le niveau du lac dans son bassin central alors que les sites des profils sismiques 5 et 9 situés sur les pentes Est

du lac ont une profondeur de 84 mètres. Ces carottes permettraient d'atteindre la base du remplissage et de potentiellement le dater.



b)	Id	X	Y
	1	4° E 4,2'	44° N 49,01'
	20	4° E 4,21'	44° N 49,03'
	5	4° E 4,43'	44° N 49,05'
	9	4° E 4,43'	44° N 49,06'

Figure 35 : Carte de navigation du lac d'Issarlès (a) avec en blanc les profils sismiques et la bathymétrie, les points bleus sont les futurs points de carottages et enfin les points rouges correspondent aux points de géoréférencement. (b) : Tableau contenant les coordonnées des points de carottage retenues.

3.4 L'étude des paléobeines lacustres comme marqueur des changements de niveau de lac : l'exemple des maars de Pavin et de Tazenat

L'objectif de cette partie va être de mettre en exergue les traces d'une éventuelle paléobeine au Gour de Tazenat et au lac Pavin en partant de l'analyse de la carte topobathymétrique fine obtenue grâce aux levées Lidar de ces maars (Figure 25 et 26). On cherche tout d'abord des zones de replat dont la morphologie peut s'apparenter à une beine. Une fois ces zones trouvées on les compare à l'emplacement des chemins IGN afin de pouvoir déterminer l'importance des aménagements dans la topographie des sites. Puis on utilise la fonctionnalité permettant la modélisation des coupes altimétriques d'ArcMap pour voir si l'on retrouve des données similaires entre ces pseudo-beine. Enfin, on compare ces données avec des zones moins anthropisées autour de lac afin de voir si cette beine est présente sur l'intégralité du cratère à la même altitude ou non.

3.4.1 Les paléobeines du gour de Tazenat

Pour trouver l'emplacement d'une beine au Gour de Tazenat on étudie d'abord le delta de Rochegude (Figure 22) pour délimiter un ancien niveau lacustre puisque le delta voit sa morphologie changer quand le lac change de niveau. Cela s'explique par le fait qu'un cours d'eau se calque sur son profil d'équilibre et va donc combler ou éroder son lit pour atteindre ce profil. Pour étudier le delta on se sert du Lidar afin d'avoir des coupes topographiques fines en plusieurs points au sein d'une zone restreinte pour obtenir une vision précise du lieu (Figure 26 a). L'étude du delta se base sur trois jeux de coupes altimétriques (Figure 36) : la première est une coupe dans la longueur du tributaire (Figure 36 b) comme la coupe de Juvigné (Figure 22), une coupe transversale du delta (Figure 36 c) et la dernière est une succession de coupes perpendiculaires au tributaire en amont du delta (Figure 36 d). On remarque tout d'abord que le profil du Rochegude (Figure 36 b) est homogène et garde plus ou moins toujours la même pente exceptée à 180 mètres. Ici, on remarque une bute qui culmine à 635,3 mètres et cet élément est visible aussi sur la coupe de Juvigné (Figure 22). Cette forme est un paléodelta synonyme d'un ancien niveau lacustre qui est resté assez longtemps pour marquer la géomorphologie. Sur le profil transversal au delta (Figure 6 c) on remarque d'une part un pic plat à 640 mètres à l'Ouest ainsi que des pentes douces entre 633,5 mètres et 634 mètres d'altitude. Cette forme de pente douce à 4 mètres au-dessus du niveau actuel du lac s'apparente à une ancienne beine lacustre. Enfin, sur le profil transversal du tributaire on remarque un replat fortement marqué à 649 mètres ainsi qu'une pente très douce entre 640 et 637 mètres.

Maintenant il faut voir si l'on retrouve des singularités géomorphologiques à ces trois altitudes (649 mètres, 640 et 637 mètres). La forme de marche à 649 mètres et la présence d'un chemin de randonnée montre que cette forme est anthropique. Quand on extrapole les pentes du tributaire on peut voir l'ancien profil d'équilibre du Rochegude (Figure 36 d). Quand on compare cet ancien profil d'équilibre au profil actuel du Rochegude on remarque une différence de 12 mètres comme le disait Juvigné. Le fait que le Rochegude est eu le temps d'inciser le delta de 12 mètres montre que le lac a baissé de niveau puisqu'avant le Rochegude pouvait se jeter dans le lac à un point 12 mètres plus haut qu'aujourd'hui. On avait donc un ancien niveau lacustre aux alentours de 642 mètres.

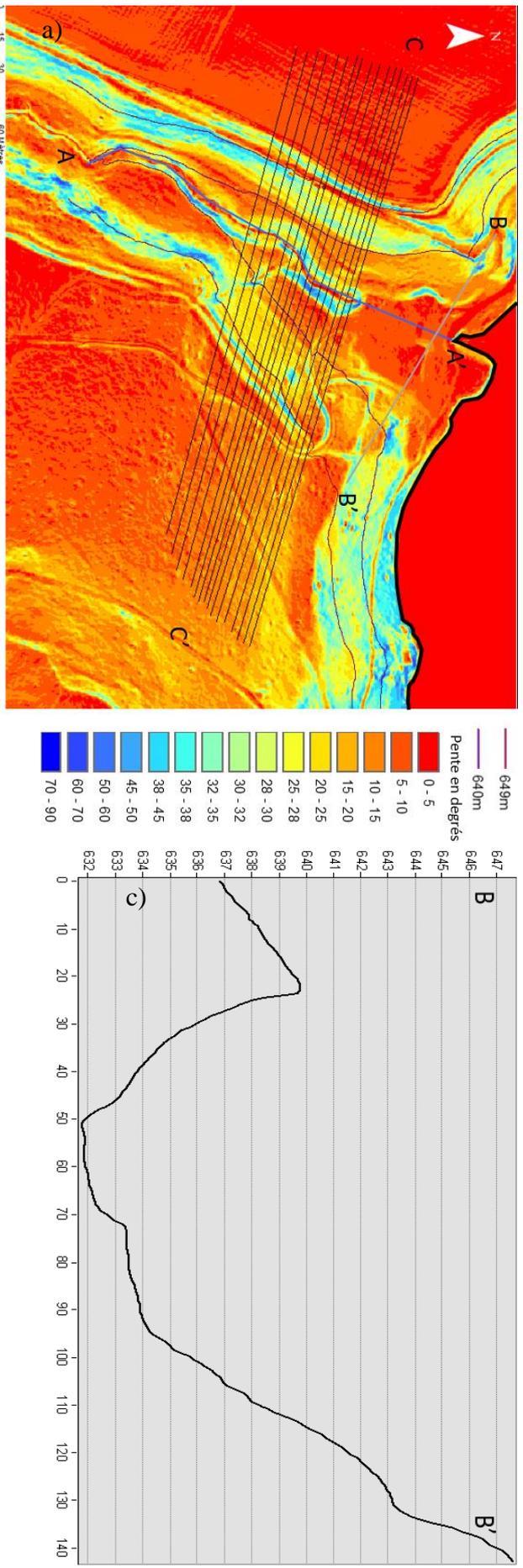


Figure 36 : Signatures géomorphologiques de paléo beines sur le Gour du Tazenat. (a) Carte des pentes du delta de Tazenat avec les coupes altimétriques ; b) Coupe altimétrique du Rochegude ; c) Coupe altimétrique transversale au delta ; d) Coupes altimétriques du tributaire 1 : Première terrasse à 649 mètres soit environ 19 mètres plus élevée que le fond de l'exutoire, 2 : Seconde terrasse à 640-638 mètres soit entre 7 et 5 mètres plus élevée que le fond de l'exutoire, 3 : Fond de l'exutoire 633 mètres

Sur la figure 37 a, on remarque deux zones de replat à 644-645 mètres d'altitude (phase II) et à 635,5 m (phase IV) ainsi que le sommet du croissant pyroclastique à 649 mètres (phase I). On voit que la beine de 644-645 mètres est moins large que celle de 635,5 mètres. Cette différence de largeur tien au fait que le substrat est plus érodé et donc le lac a dû rester plus longtemps à cette altitude ; cette hypothèse corrobore avec la présence du paléodelta à la même altitude (Figure 37 b) laissant donc penser qu'à une époque le gour de Tazenat était à un niveau de 635 mètres, soit 5 mètres au dessus du niveau actuel. Les pentes en amont de ces beines sont de l'ordre de trente à quarante degrés (Annexe 11). L'étude de ces replats doit être croisé avec l'anthropisation du site qui pour cette zone se cantonne à la construction d'un chemin qui suit l'isoligne 644 mètres.

Sur la figure 38 a), trois replats se succèdent à 647 mètres (phase II), 637-636 (phase III) et 632 mètres (phase IV). Tout comme pour les beines précédentes leur largeur varient. Les replats de 647 mètres et de 645 mètres (phase II) sont reliés et forment le chemin. Les replats de 635 mètres et 632 mètres sont eux aussi reliés, comme ils sont assez larges on peut supposer que le lac est resté un temps conséquent à cette altitude mais n'a pas érodé de la même façon le croissant pyroclastique.

Pour résumer au vu du substrat du cratère, la présence de chemin à l'altitude du palier du delta (649 mètres) on peut penser que le chemin fût tracé sur une zone déjà plane, facilitant ainsi sa construction sur les paléobeines qui sont des substrats plus meubles. On peut penser que ces replats, sont des paléobeines littorales c'est-à-dire des banquettes de matériel littoral façonnée par la houle sur le bord d'un lac. On ne les remarque que sur la partie Ouest du cratère et ont été tout ou en partie modifié lors de la création du chemin. Il faut cependant faire attention car les deux paléobeines étudiées (numérotées II et III des figures 37 et 38) sont actuellement des chemins et donc sont anthropisées contrairement à la beine IV. Il y aurait donc eu quatre niveaux de lac : I – 649 mètres (+19 mètres), II – 647-645 mètres (+17/15 mètres), III – 640-638 mètres (+10/8 mètres) et IV – 635-633 mètres (+5/3 mètres). L'incision de 12 mètres semble accentuer l'idée que l'on ait eu un potentiel niveau de lac vers 645 mètres (II) ou 640 mètres (III).

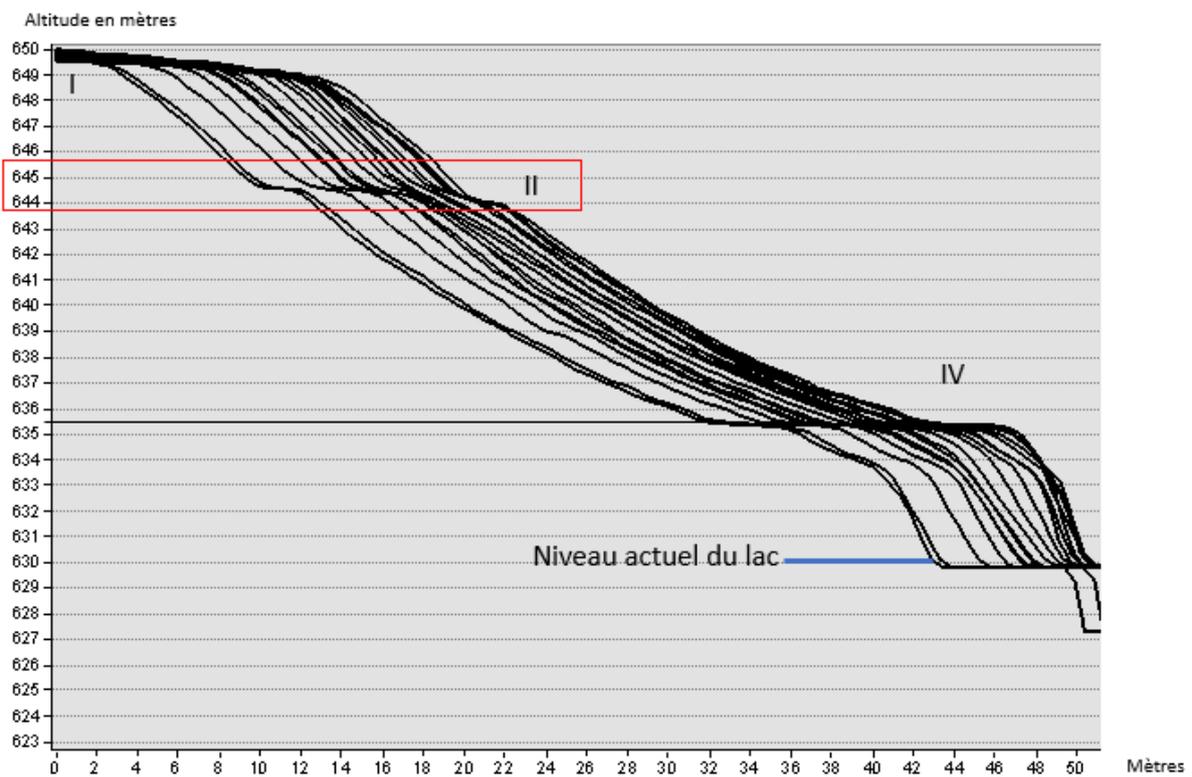
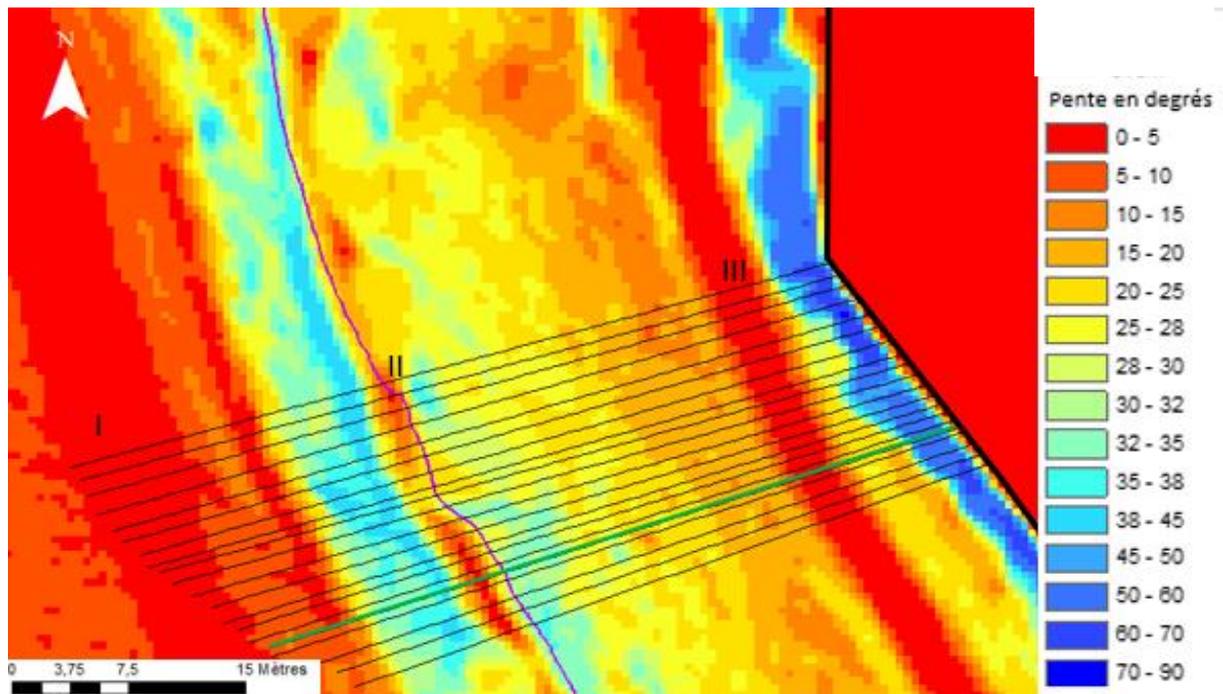


Figure 37 : Analyse géomorphologique du cratère du Gour de Tazenat (a) : Carte des pentes avec en noir le niveau 0 du lac, la localisation en vert de la courbe des pentes (Annexe 11), de l'isoline 644 mètres, emplacement du chemin et en noir l'emplacement des coupes topographiques b). : Courbes altimétriques de la zone étudiée (phase I) : Sommet plat du cratère, (phase II) : Zone de replat à 644-645 mètres, soit 12 mètres au-dessus du niveau du actuel du Gour de Tazenat ; chemin, potentielle paléobeine (phase IV) : paléobeine.

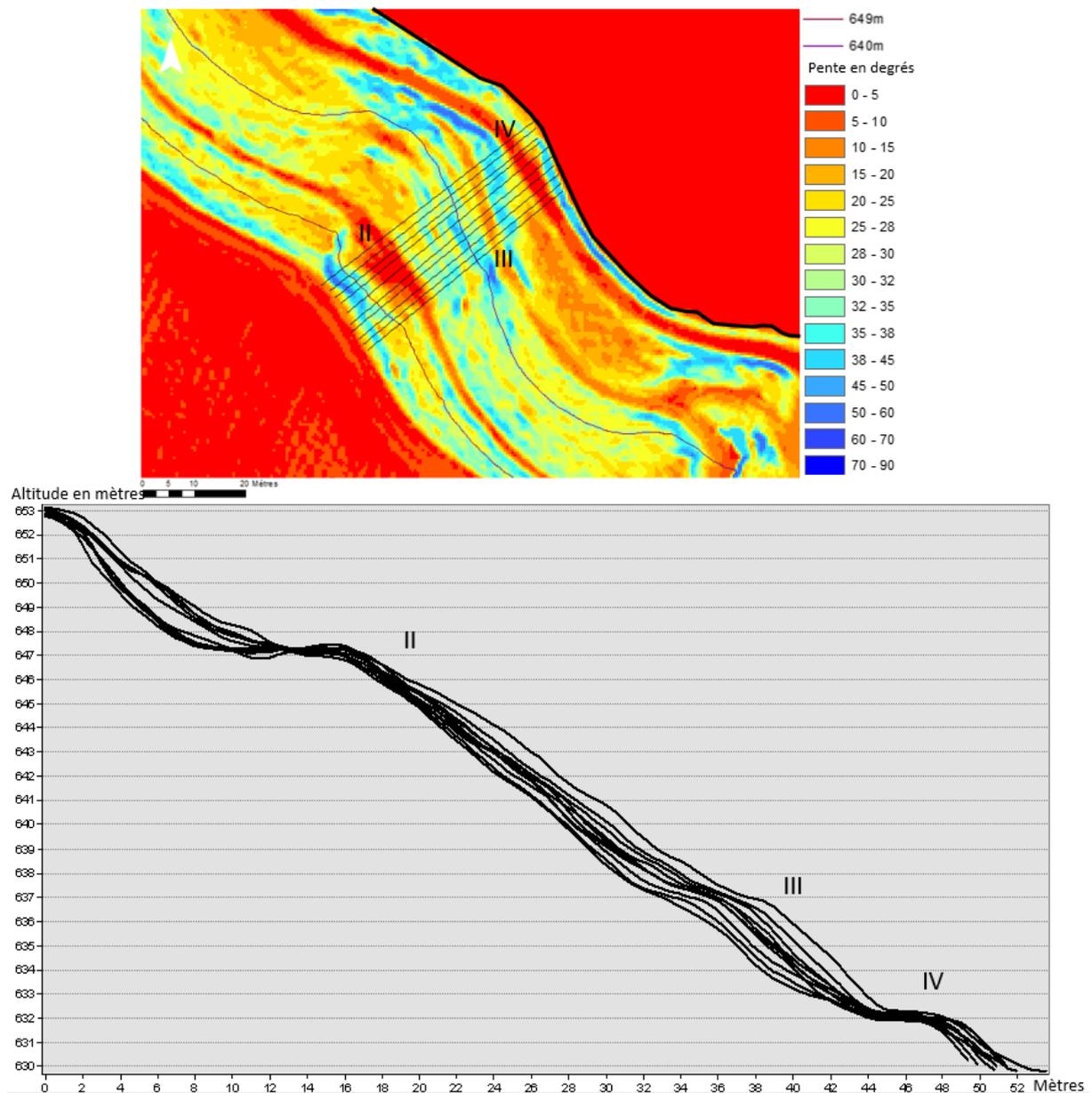


Figure 38 : Analyse géomorphologique du cratère du Tazenat (a) : Carte des pentes avec en noir le niveau 0 du lac et l'emplacement des coupes topographiques (b) : Courbes altimétriques de la zone étudiée **II** : Zone de replat à 644 mètres **III** : replat à 637 mètres, **IV** : Replat à 632 mètres.

Ces chutes de niveau de lac peuvent avoir favorisées des glissements de terrain dans le lac (Figure 39), ce qui corrobore avec les profils sismiques obtenus dans le lac. Le remplissage sédimentaire du fond du lac est visible sur seulement 3 mètres (Juvigné et al., 1998). Les pentes raides quant à elles ne sont drapées que d'une fine couche de sédiments (Sismique réflexion de 2019). Enfin au pied des pentes et dans le fond du bassin on remarque cinq faciès chaotiques correspondant à des remaniements gravitaires (Chapron et al., accepté).

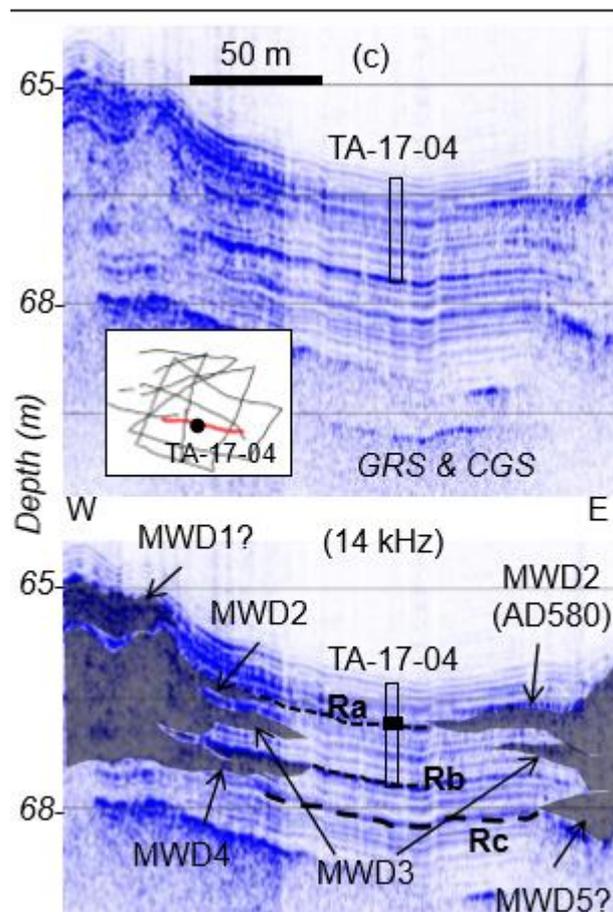


Figure 39 : Profil sismique du lac de Tazenat montrant des dépôts de glissement de masse avec des turbidites se rejoignant de part et d'autre du lac.

Ce profil montre que l'on ne voit que 3 mètres de sédiments car il y a du gaz en dessous qui absorbe le signal. Nonobstant, la carotte (Annexe 7) montre que les dépôts de glissement de masse évoluent vers le centre sous forme de turbidites. Ces remaniements gravitaires correspondent à des événements régionaux (puisque l'on voit le glissement de part et d'autre du lac MWD3) qui ont fait s'effondrer partiellement les rives du gour de Tazenat (AD 580, 2250 ± 50 cal. BP, 2730 ± 17 cal BP) qui correspondraient à des activités sismiques de la Limagne selon Chapron et al (accepté).

3.4.2 Les paléobeines du lac Pavin

Pour le lac Pavin on utilise la même méthode avec la recherche de replat pouvant potentiellement être des paléobeines, cependant comme ce maar ne possède pas de delta on étudie directement le cratère. Tout d'abord on remarque des géométries similaires à celle du Tazenat sur le côté Ouest de l'exutoire (Figure 40). Comme pour l'étude de Tazenat on compare les zones planes avec les chemins IGN pour savoir si ces zones ont été fortement anthropisées ou non. On remarque un chemin à 1201 mètres qui passe sur l'un des trois replats qui sont à

1214 mètres (phase I), 1206 mètres (phase II) et 1201,85 mètres (phase III). Sur le profil altimétrique (Figure 40) on observe des proxis proches de ceux du gour de Tazenat avec avec des replats entourés de part et d'autre de pente de l'ordre de la trentaine de degrés.

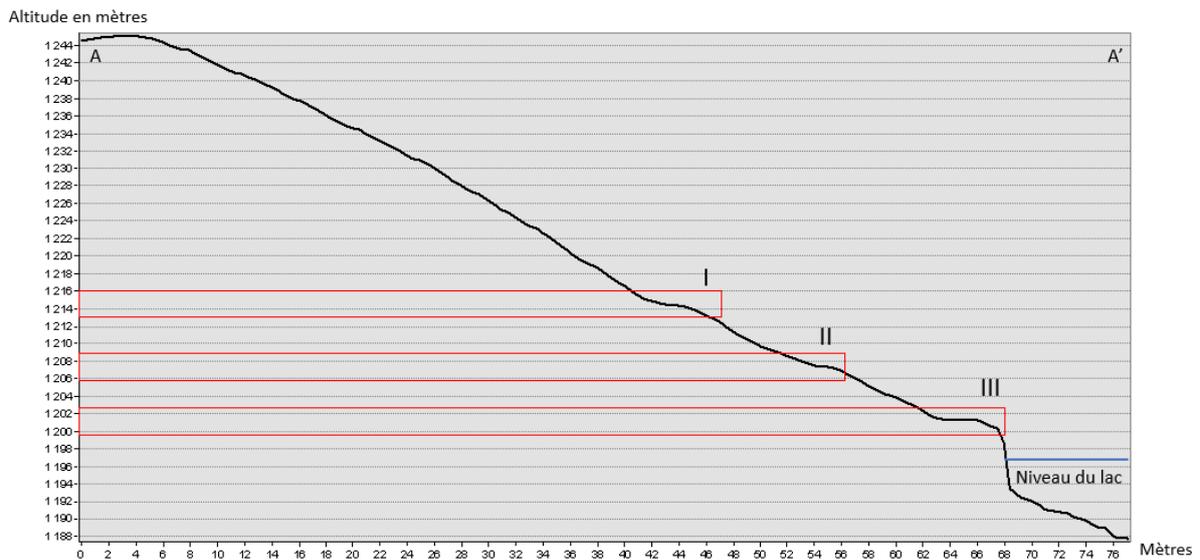
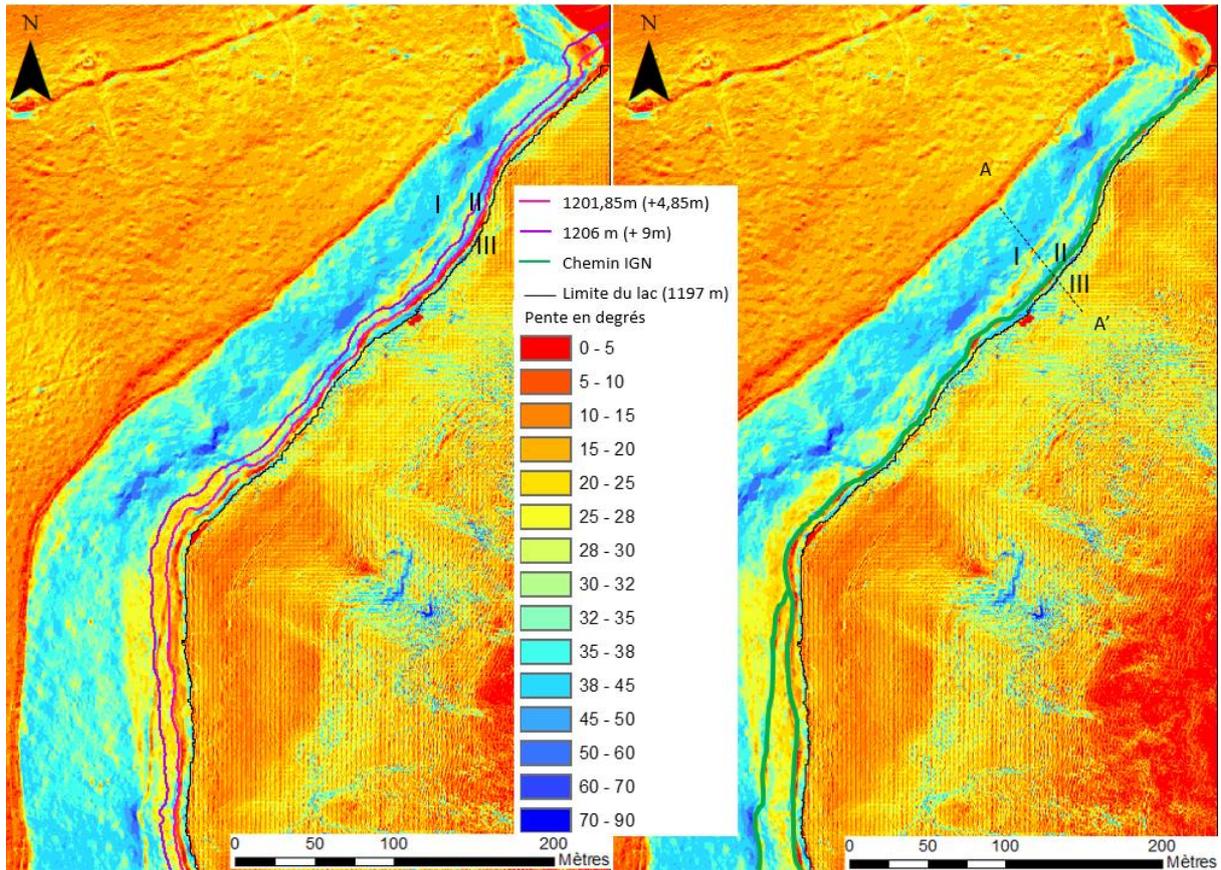


Figure 40 : Analyse géomorphologique de la partie NW du cratère du Pavin a : Carte des pentes en degrés du cratère du Pavin avec en noir le niveau 0 du lac ainsi que les chemins IGN et les isolignes d'anciens niveaux lacustres ; b : Coupe altitudinales avec les trois paléo beines potentielles.

Maintenant pour valider le fait que ce niveau à 1214 mètres soit bien une paléobeine on cherche un replat à la même altitude autour du lac (Figure 41) afin de vérifier que cette singularité soit continue et non pas ponctuelle. Si ce niveau est ponctuel il pourrait s'agir de construction anthropique ou de singularité géomorphologique. Lorsque l'on couple les anciens niveaux de lac et le chemin IGN (Figure 41) on remarque a nouveau que cette beine n'a pas été

modifiée par le chemin. On trouve bien à l'Est du cratère trois géométries à 1214 mètres d'altitude qui s'apparentent, sur la carte des pentes, à des paléobeines. Et comme précédemment les coupes altitudinales (Figure 41) montrent un chemin en marche d'escalier qui correspond au chemin IGN qui se situe au dessus des 1214 mètres d'altitude de notre paléobeine, ainsi que des pentes plus douces sur les profils D-D' et C-C' à 1214 mètres d'altitudes. Cependant on remarque que la paléobeine de 1214 mètres d'altitude est peu visible sur le profil B-B', cela peut s'expliquer par le fait que les pentes en amont de ce niveau ne soient pas assez fortes pour apporter le matériel nécessaire à sa formation, que la végétation limite les apports de pentes ou encore que le lac n'a pas maintenu ce niveau assez longtemps pour éroder suffisamment le croissant pyroclastique. Enfin, on remarque la présence de beine subaquatique sur ces profils, il est à noter que sur les profils C-C' et B-B' qui on les beines subaquatiques actuelles les plus marquées il y a des sources (Figure 17). On peut donc penser qu'il existe une relation entre la présence de beines et de sources ces dernières favorisant la création de ces premières. On observe ces trois beines aussi à l'est de l'exutoire (Annexe 12)

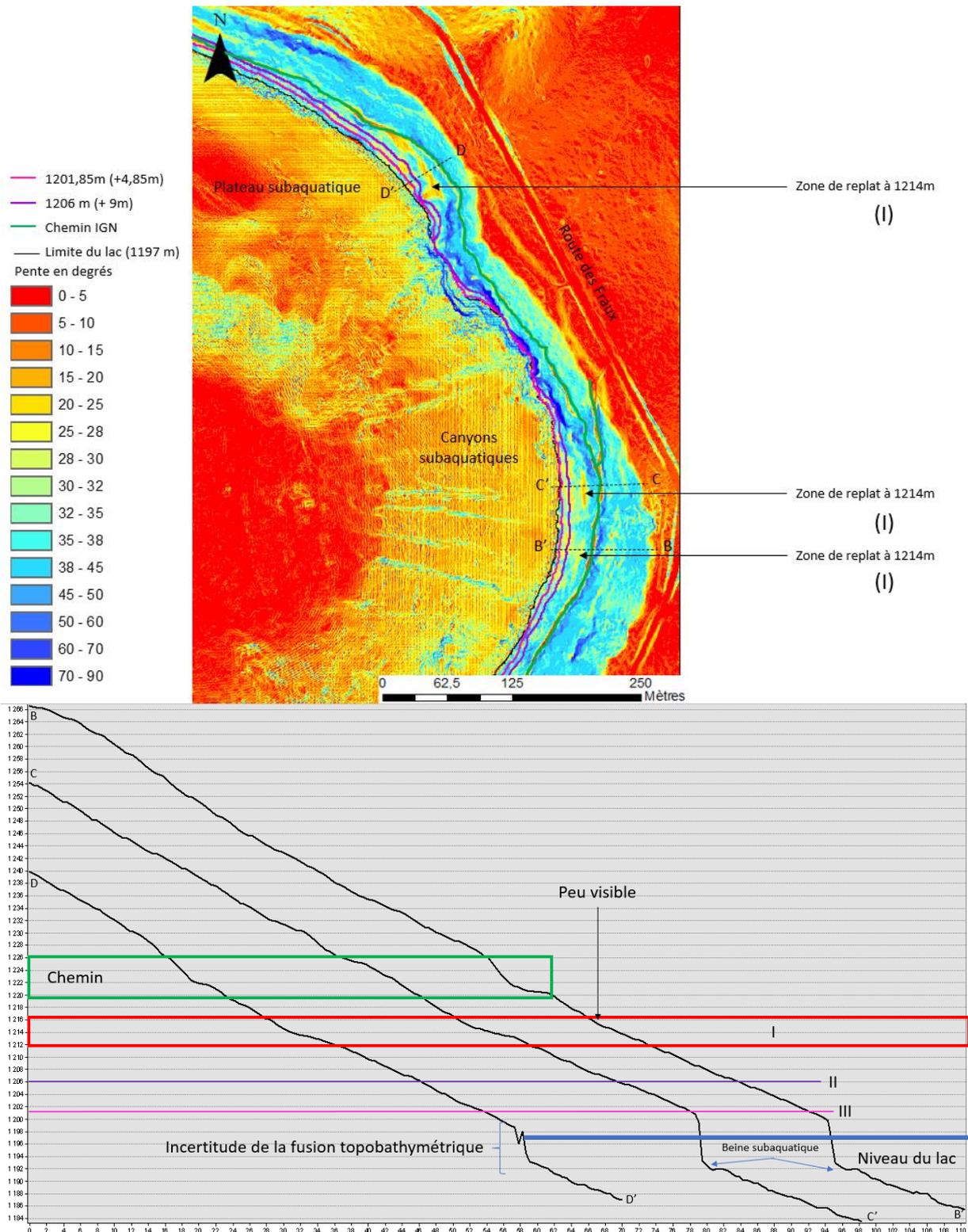


Figure 41 Analyse géomorphologique de la partie NE du cratère du Pavin (a) : Carte des pentes en degrés du cratère du Pavin avec en noir le niveau 0 du lac ainsi que les chemins IGN et les isolignes d'anciens niveaux lacustres ; b : Coupe altitudinales montrant la zone de paléobeine à 1214 mètres.

Enfin l'étude de l'exutoire (Figure 42) montre d'une part au Nord le chenal de l'exutoire qui est la manifestation physique en aval des ruptures du cratère (Chapron et al., 2016, Chassiot et al., 2016 et 2018). Ce chenal se manifeste sur la carte des pentes par une zone plane (rouge)

lézardée par de faibles pentes. D'autre part on note la présence de replats de part et d'autre de l'exutoire. On remarque que ces zones correspondent à l'altitude 1201 mètres (Paléo exutoire III) à l'Ouest et deux pentes plus faible à 1206 mètres et 1214 mètres qui pourraient être des paléo exutoires des deux autres niveaux lacustres. Cela laisse donc penser que ces zones sont des paléo exutoires montreraient potentiellement trois anciens niveaux lacustres à 1214 mètres (I), 1206 mètres (II) et 1201,6 mètres (III).

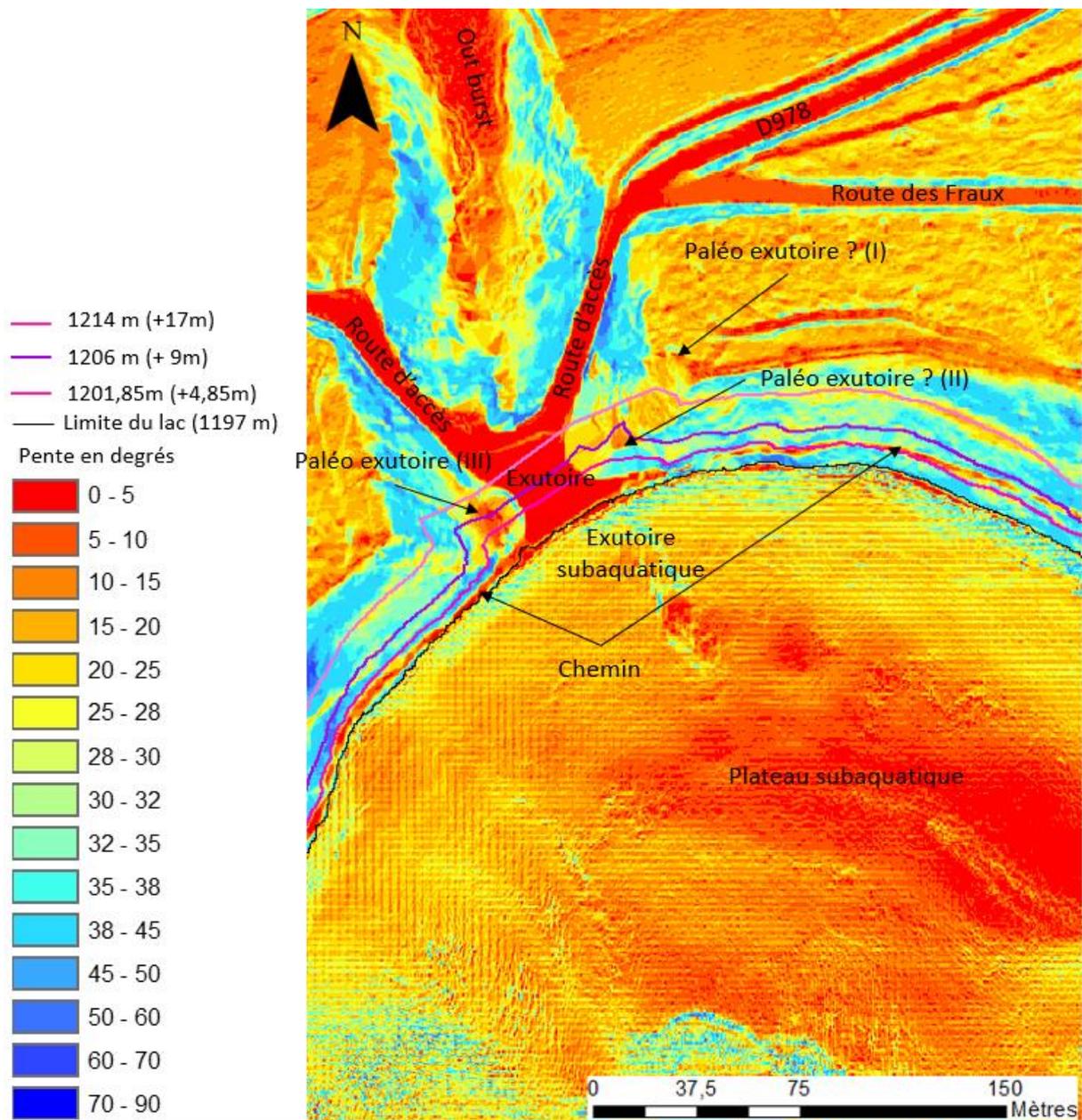


Figure 42 : Carte des pentes de l'exutoire de Pavin avec la présence de deux zones de replats correspondant probablement à des paléo exutoires.

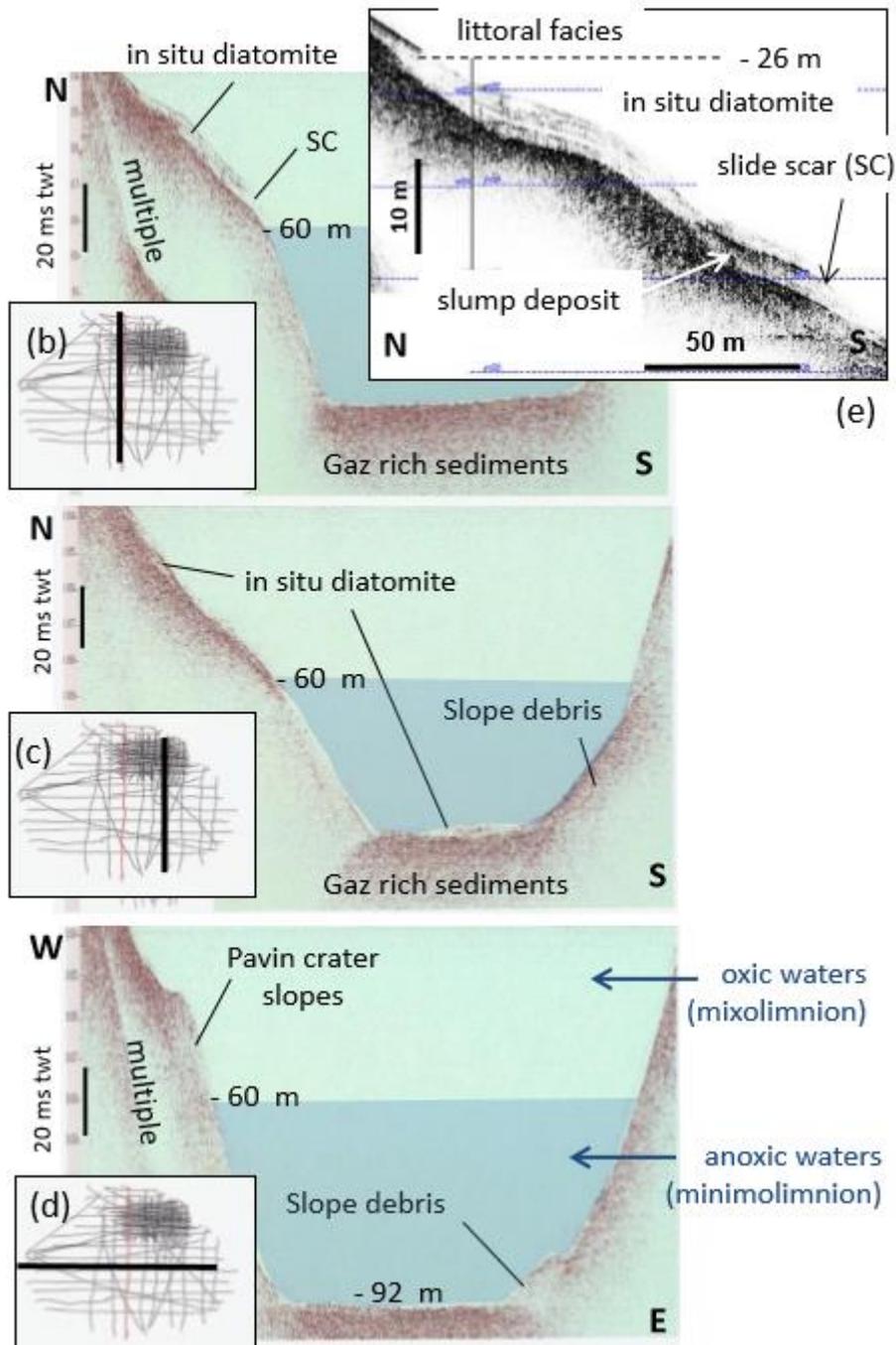


Figure 43 : Principaux environnements sédimentaire du Pavin identifiés à partir des profils sismique 3,5 kHz et 12 kHz. Sur ce dernier on observe clairement là où il y a une différenciation entre le faciès littoral et le faciès diatomite.

Sur les profils sismiques (Figure 43) on voit la présence d'un faciès littoral jusqu'à 26 mètres de fond, mais une carotte prise à 17 m de bathymétrie illustre des diatomites sous les sédiments littoraux (Chassiot et al, 2016). Cela implique que le lac a au minimum chuté de 9 m à cette époque (Chassiot et al, 2016). Cela suggère l'existence d'un paléolac à $1997+9=1206$ mètres (Chapron et al., 2016) c'est-à-dire à la même altitude que la paléobeine et que le paléo exutoire identifié sur les données Lidar.

4 - Discussion

4.1 Maar d'Issarlès

Les dépôts de glissement de masse se voient par leur faciès chaotique et au bout de ces dépôts on remarque une longue et fine protubérance qui est l'endroit où ces dépôts sont les plus fins (Figure 13). Au front des glissements on retrouve parfois des niveaux sableux granoclassés qui produisent des réflexions sismiques de plus forte amplitude que le sédiment lacustre aux alentours : c'est la signature acoustique typique d'une turbidite. Entre les turbidites 3 et 5 (T3 et T5) on remarque deux réflecteurs très continus et de plus forte amplitude acoustique (Ra et Rb) que celle des turbidites; ce sont des signatures typiques de retombés de niveaux de cendres aussi appelées téphras (Chapron et al., en préparation). On observe au maximum 30 mètres de sédiment dans le fond du lac qui pourrait provenir de l'érosion du croissant pyroclastique au cours du temps. Le lac est alimenté par les infiltrations et les précipitations et ne possède qu'un exutoire subaquatique. Cela peut s'expliquer par l'âge ancien du maar qui aurait pu connaître un ou plusieurs abaissement de son niveau en dessous de son exutoire aérien et ne se voit aujourd'hui régulé que par son exutoire subaquatique. Nonobstant, il ne faut pas oublier la présence de l'anthropisation du lac qui fait marnage le lac de 50 mètres (Jourde et al., 2015 (Figure 44)).

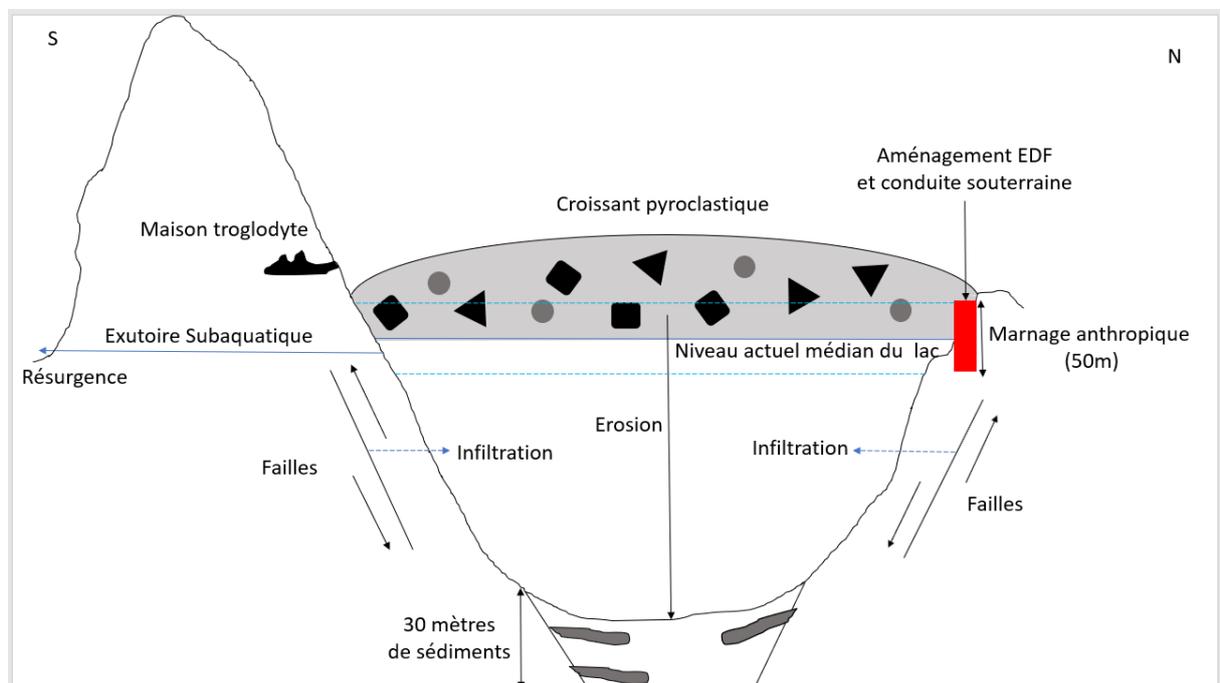


Figure 44 : Schéma résumant les principales mécaniques du maar d'Issarlès.

On peut se questionner sur l'impact anthropique datant du Néandertal (comme le montre les maisons troglodytes ; Nomade et al., 2016) ainsi que la relation de l'Homme de Néandertal

et son milieu. Dans la grotte Chauvet il y a une peinture montrant une éruption phréatomagmatique datant de 36 000 ans (fin du Néandertal) pouvant être d'une part la plus ancienne description d'une éruption phréatomagmatique et d'autre part un précieux indice quant à la datation du maar d'Issarlès (puisque ce dernier est visible depuis la grotte Chauvet Nomade et al., 2016). Enfin, afin de comprendre les glissements de terrain profonds (MWD 6 de la Figure 13) il faudra attendre le grand carottage (Figure 35) prévu en Octobre 2020 qui pourrait permettre de dater les glissements de terrain anciens ainsi que le carottage plus petit sur les pentes (Figure 35) qui pourrait permettre de carroter jusqu'au substratum et ainsi dater le cratère.

Pour savoir l'origine des glissements subaquatiques il faudra les dater et comparer leur chronologie à celles des glissements documentés dans les maars voisins du Bouchet et de Saint-Front. S'il existe des glissements synchrones entre ces trois lacs on pourrait identifier des paléoseismes comme cela a été fait plus au Nord dans la Chaîne des Puys (Chassiot et al, 2016 ; Chapron et al, accepté).

4.2 Gour de Tazenat

Pour le gour de Tazenat on remarque quatre paléobeines dont une (III) qui correspond au paléodelta vu par Juvigné et al., (1998) 5 mètres au dessus de la côte actuelle. Ces chutes de niveau de lac pourraient résulter d'un séisme (1) qui déstabilise les pentes et crée des glissements de terrain (subaquatique ou non). Ces glissements créent à leur tour des vagues de taille importante (3 ; tsunami lacustre) qui en frappant contre l'exutoire le fragilisent (4) et en fonction de sa porosité et de sa composition peuvent le faire rompre. Cette rupture de l'exutoire amène donc à une chute rapide du niveau du lac (Figure 45). Cependant, le fait qu'il n'y ait pas de niveau net pour ces paléobeines mais des intervalles laissent penser qu'il y a eu quatre phases de chute du niveau de lac : I – 649 mètres (+19 mètres), II – 647-645 mètres (+17/15 mètres), III – 640-638 mètres (+10/8 mètres) et IV – 635-633 mètres (+5/3 mètres). Mais que ces phases n'ont pas toutes été brutales et cela s'est fait doucement expliquant qu'il n'y ait pas de pied de falaise franc. Pour vérifier s'il y a bien eu quatre basses de niveau du lac il faudrait aller sur le terrain pour étudier les pieds de falaise car le télétravail de géomaticien est limité pour cette expertise.

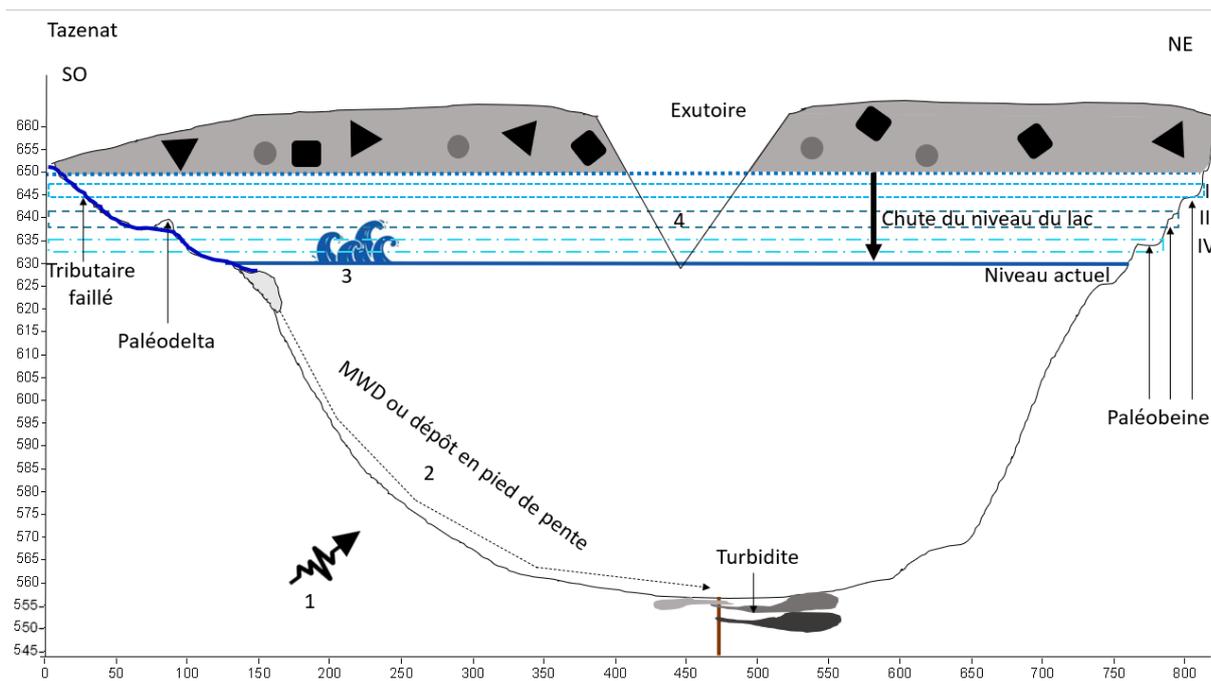


Figure 45 : Schéma résumant les principales mécaniques du gour de Tazenat.

Sur la carotte TA-17 (Annexe 7) on observe un changement de faciès pouvant dater de 1949 (Chapron et al., accepté) qui pourrait correspondre aux changements de mode d'exploitation agropastorale avec d'une part l'usage d'intrant chimique dans le bassin versant hydrologique du lac qui terminent dans ce dernier par le biais des failles du tributaire. Et le pastoralisme sur les berges du lac et dans des zones reliées à ce dernier pouvant le polluer (excrément, ...). L'emploi du courantomètre couplé au capteur hydrosurveyor pourrait permettre de définir l'emplacement de ces infiltrations dans le Gour du Tazenat. L'emploi d'intrant est l'une des causes de l'eutrophisation des lacs et cela serait couplé avec le changement climatique qui modifie la température des eaux les rendant plus chaudes et donc favorables à la prolifération de cyanobactérie. La seconde théorie est que suite à des tremblements de terre (1) des glissements de terrain (2) auraient libéré d'ancienne cyanobactéries inactives et les auraient réveillées favorisant ainsi le bloom actuel.

4.3 Lac Pavin

Il y a deux problématiques sur le lac Pavin : la première qui a été moins étudiée dans ce rapport est le lien entre éruption limnique et ses dépôts. On peut penser qu'il existe un lien entre la taille des dépôts d'éruption limnique et l'intensité de l'éruption puisque pour ce lac l'éruption

n'a causé aucun mort et les dépôts sont assez disparates et petits (Annexe 6) alors que l'éruption du Nyos a laissé une turbidite de 2,5 mètres (Annexe 1).

La seconde problématique a été la définition des paléo niveaux du lac par l'approche géomorphologique (Figure 46). On remarque tout d'abord que le niveau actuel du lac est lié à celui du Creux de Soucy (Meybeck et al., 2016) et que comme pour le Gour de Tazenat le lac n'aurait pas connu de niveau plus faible (même si de nouvelles mesures bathymétriques seront ici nécessaire pour vérifier ce point). Le lac est alimenté par des sources (aériennes et subaquatiques) et se vide par un exutoire aérien et subaquatique entre -12 et -26 mètres de profondeur (Chapron et al, 2016). On voit trois anciens niveaux de lac. D'après les travaux de L. Chassiot on sait que le lac Pavin a chuter de 9 mètres en AD 600 suite à un glissement de terrain qui a provoqué une rupture du croissant pyroclastique. Cet évènement correspond à la paléobeine II qui est à 1206 mètres d'altitude (9 mètres plus haut que le niveau actuel. A partir de là on a un niveau supérieur et un inférieur, on peut supposer que le niveau supérieur est plus récent qu'AD600 et l'inférieur plus ancien. La paléobeine I à 1214 mètres (soit 17 mètres au-dessus du niveau actuel) pourrait correspondre potentiellement à la période de l'Âge du Bronze puisqu'à cette époque on note un changement dans les assemblages d'algues de diatomées dans la carotte Pav12 prise au centre du lac (Figure 34) suggérant un changement de volume d'eau et un léger changement dans la composition des sédiments (Chassiot et al 2018 ; Serieyssel et al., préparation). Enfin le niveau le plus bas à 4,8 mètres au-dessus du niveau actuel est antérieur au XVIII^{ème} siècle puisqu'à cette époque la côte du lac était déjà fixe à 1197 mètres (Meybeck, 2016 et 2019, Miallier 2020). Or l'étude sédimentaire de la carotte Pav12 montre qu'il y a eu un évènement gravitaire majeur daté de AD1300 qui est semblable à l'évènement AD600. L'évènement AD1300 aurait donc pu créer une rupture du croissant pyroclastique faisant ainsi s'abaisser le lac à son niveau actuel. Cette hypothèse corrobore avec un paléoxutoire vu par Miallier à 1201,85 soit à la même altitude que la paléobeine III. On aurait donc eu une côte du lac Pavin à 1214 mètres (soit 17 mètres au-dessus du niveau actuel) potentiellement pendant du l'Âge du, puis un niveau entre l'Âge du Bronze et AD600 à 1206 mètres (soit 9 mètres au-dessus du niveau actuel), ensuite vient le niveau à 1201,8 entre AD600 et AD1300 (soit 4,8 mètres au-dessus du niveau actuel). Le niveau du Pavin se serait ensuite stabilisé depuis AD1300.

Ces différents niveaux résultent comme pour Tazenat de tremblements de terre (1) qui provoque des glissements de terrain (2) qui eux entraînent des tsunamis lacustres (3) pouvant détruire l'exutoire et faire baisser le niveau du lac (4). Cependant, la présence de gaz dans le

fond du lac laisse subodorer que les glissements de terrain (2) provoquent un dégazage et donc une éruption limnique (5) dont les sédiments remaniés viennent se déposer sur le plateau (6) et ont une signature forte en oxyde de fer (Arricau, 2019).

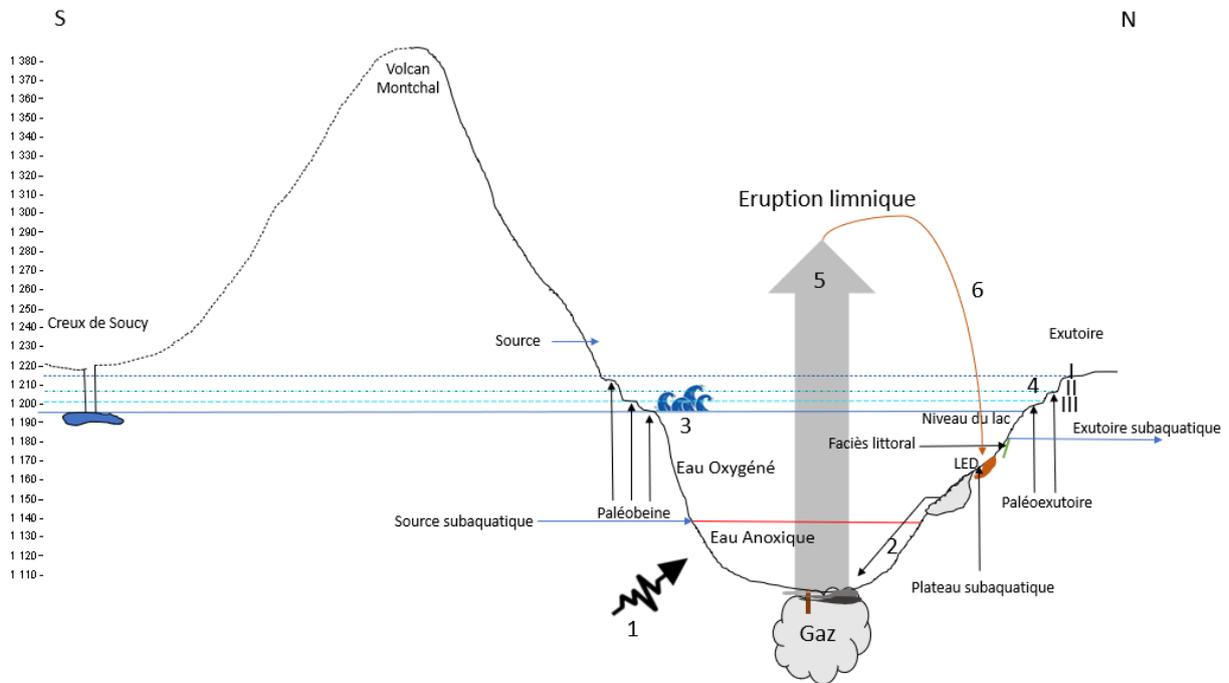


Figure 46 : Schéma résumant les principales mécaniques du lac Pavin.

4.4 Définition d'une beine

Il convient donc de définir une typologie propre et précise de ce qu'est une beine lacustre en contexte de maar (Figure 47) pour préciser les résultats de cette étude géomorphologique. Comme nous l'avons vu les paléoniveaux de lac sont donnés par tranche d'altitude et cela est dû à une incertitude résultant de la complexe composition d'une beine de maar. Cette incertitude est sur la forme de la beine (hauteur de la falaise et largeur de la beine). Ces deux facteurs sont régis par : la végétation en amont, la pente (α), le substrat (ϕ porosité/perméabilité du croissant pyroclastique) et les précipitations pour la partie aérienne puisque ce sont ces facteurs qui vont déterminer combien de matériel va venir entretenir la beine. Pour le facteur aquatique c'est le marnage (δ anthropique ou non) qui détermine la hauteur de falaise. À cela s'applique des facteurs globaux qui sont le faible vent qui évite l'érosion éolienne et le temps d'exposition du littoral à l'érosion par les eaux du lac. À ces facteurs globaux s'ajoute un facteur ponctuel qui est le risque de séisme (1) qui provoque des glissements de pente (2) qui destabilisent les

sédiments en place (en fonction de sa cohésion) et peut résulter en des tsunamis lacustres (3) qui peuvent détruire des morceaux de falaise.

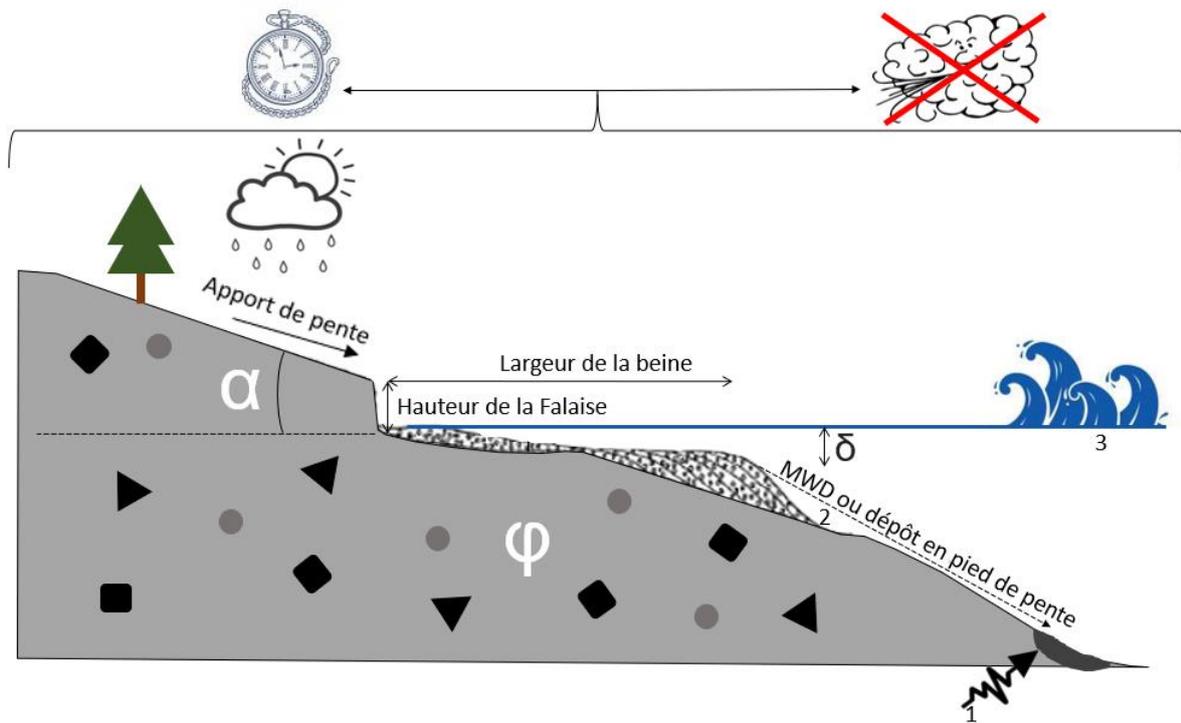


Figure 47 : Schéma résumant les principales mécaniques d'une beine de maar.

On peut donc résumer comme suit notre fonction de l'incertitude :

Incertaince = Hauteur de la falaise et largeur de la beine = (Pente, géologie, végétation, anthropisation, climat et temps).

Conclusion

Au terme de cette étude nous avons vu que ces lacs de prime abord naturels avec un unique chemin aménagé pour en faire le tour sont en réalité plus anthropisés qu'on ne pourrait le croire, et ce dans leur écosystème même. Les manifestations de l'exposition aux risques naturels des lacs sont diverses. Pour la géomorphologie, on observe la présence de paléoenvironnement (avec des exutoires, delta et beines) et de surface chaotique reliquat d'une surverse comme pour Pavin. Pour l'aspect sédimentaire, la présence de dépôt de glissement de masse montre l'exposition d'un site au tremblement de terre. Les conséquences les plus visibles dans nos milieux sont d'une part les glissements de terrains aériens et subaquatiques et d'autre par la chute de niveau de lac par rupture de cratère.

Effectivement, l'anthropisation des bassins versants et des exutoires des lacs à des fins agricoles a modifié ces derniers de façon conséquente. Les données topobathymétriques fines permettent ainsi de reconstituer la géohistoire d'un site par le prisme de la lecture sédimentaire et géomorphologique. Cette lecture nous a aussi permis de montrer que les zones d'impact de l'humain sur les lacs sont diverses (construction de barrages, marnage artificiel, déforestation qui accentue l'érosion).

De plus, les baisses de niveau des maars d'Issarlès, de Tazenat et de Pavin ont des causes multiples. Concernant les travaux EDF sur le maar d'Issarlès de 1947 à 1954 on peut se questionner sur la résistance et la résilience d'un tel édifice face au contexte géologique actif dans la zone. Il semble donc pertinent de continuer d'étudier le maar d'Issarlès car la bathymétrie est facilement lisible puisqu'il n'y a que peu de gaz qui absorbe le signal de la sismique réflexion. La problématique de l'anthropisation et de la modification du bassin versant permet, sur un lac étudié, de travailler sur diverses thématiques intrinsèquement liées.

Pour le gour de Tazenat les glissements de terrain profonds régionaux ne sont pas datés et une campagne permettrait de résoudre cela. De plus l'eutrophisation du lac en fait un site à privilégier pour étudier les relations lac-bassin versant. Pour les anciens niveaux de lac trouvés on pourrait creuser à la tarière au niveau de l'exutoire afin de voir si l'on trouve du sédiment lacustre, ce qui permettrait de valider cette théorie.

Le site de Pavin voit une prise en compte du risque d'eutrophisation du lac avec le PPRI mis en place dans le bassin versant dans le cadre du l'ENS. On suppose que la méromicticité du lac Pavin proviendrait de l'action contiguë des glissements AD600 et AD1300. De plus, au vu des dépôts d'éruption limnique de l'ordre de quelques centimètres on peut supposer que le risque de ces éruptions est modéré face à des lacs comme celui du Nyos.

Pour tous ces lacs on observe des incertitudes (surtout pour les beines du gour de Tazenat). Ces dernières proviennent d'une part du fait que mon stage s'est intégralement déroulé en télétravail alors que ces hypothèses devraient être affinée par le terrain pour être plus sûres. D'autre part, le manque d'un suivi physique et continue qui aurait pu être fait si j'avais travaillé au laboratoire GEODE a rendu certaines notions difficiles à assimiler, et ce même si Emmanuel Chapron s'est rendu très disponible par mail et par téléphone durant ma période de stage. Je regrette cependant de ne pas avoir pu aller plus loin de ce travail et affiner la rédaction de ce rapport de stage. Ce stage, malgré son déroulement atypique, m'a conforté dans mon projet professionnel de postuler à un contrat doctoral universitaire traitant des thématiques des lacs ainsi que de la géomatique.

La dernière conclusion de ce rapport de stage tient d'un des supports utilisés pour la cartographie : le site de Géoportail. En effet, si l'on compare ce site avec son homologue suisse Swiss Topo ce dernier propose de faire des cartes avec directement le Lidar et la bathymétrie multifaisceau du lac Léman. Il me semble pertinent de réfléchir à l'importance de mettre à disposition de telles données au grand publique afin d'aider d'une part le travail de recherche et d'autre part permettre à des non spécialistes de travailler avec de telles données.

Bibliographie

M. Anzidei, A. Esposito (2010) Lake Albano: Bathymetry and level changes in: Special Publications of IAVCEI, 3 pp. 229–244.

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, pp. 2800–2816.

H. Baulig (1970) Vocabulaire franco-anglo-allemand de géomorphologie, Éditions Ophrys, Paris, 230 p.

E. T. Berger, Site du lac d'Issarlès et du Cherchemuse, Syndicat Intercommunal pour le Thermalisme et l'Environnement, 15 p.

E. Chapron (1999) Contrôles climatique et sismo-tectonique de la sédimentation lacustre dans l'avant-pays alpin (Lac du Bourget) durant le Quaternaire récent, pp. 263.

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 18 p.

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 System Sciences, 10, pp. 1815–1827.

E. Chapron (2010) Lac Pavin mauvaise réputation ou récente éruption ? in: Éruption Objectif Volcans n° 23, pp. 30-43

E. Chapron (2016) EDiFiS « Éléments de Diagnose des sédiments Fluviaux Stockés à l'amont des retenues sur cours d'eau avant effacement », Rapport scientifique, 76 p.

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

E. Chapron, G. Ledoux, A. Simonneau, P. Albéric, G. St-Onge, P. Lajeunesse, P. Boivin, M. Desmet (2016) 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 pp. 381-407.

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.

E. Chapron, A. Foucher, L. Chassiot, W. Fleurdeus, L. Perderaux, I. Gay-Oveiero, M. Lavrieux, M. Motellica-Heino, S. Salvador-Blanes (submit) Evaluating Holocene environmental changes and natural hazards in the French Massif Central from a region lake sediment approach, 33 p.

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 pp. 9–25.

L. Chassiot, Y. Miras, E. Chapron, A-L. Develle, F. Arnaud, M. Motellica-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.

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) pp. 134–150.

L. Chassiot, Y. Miras, E. Chapron, A-L. Develle, F. Arnaud, M. Motellica-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.

M. Coûteaux (1984) Recherche pollenanalytiques au lac d'Issarlès (Ardèche, France) : Evolution de la végétation et fluctuations lacustres in: Bulletin de la Société Royale de Botanique de Belgique T. 117, Fasc. 1, pp. 197-217.

V. de Crespin de Billy, P. Reyes-Marchant, N. Lair, B. Valadas (2000) Impact of agricultural practices on a small headwater stream: terrestrial and aquatic characteristics and self-purifying processes in: Hydrobiologia 421, pp. 129–139.

E. Debard et J.-F. Pastre (2008) Nouvelles données sur les téphras pléistocènes piégés dans les remplissages karstiques ardéchois (S-E France). Quaternaire 19, pp. 107-116.

E. Defive (1996) L'encaissement du réseau hydrographique dans le bassin supérieur de la Loire. Contribution à l'étude des rythmes d'évolution géomorphologique en moyenne montagne volcanisée. Thèse, université Paris I Panthéon-Sorbonne, 577 p.

E. Defive, A.-M. Dendievel, J.-F. Berger, A. Barra, E. Bouvard-Mor, H. Cubizolle, J.-P. Raynal (2018) 1500 ans d'histoire fluviale dans la vallée du Gage (Bassin supérieur de la Loire, sud-est du massif central, France) : approche pluridisciplinaire in: Géomorphologie, Relief, Processus, Environnement, vol. 24, numéro 4, pp. 329-350.

E. Defive, D. Miallier, T. Pilleyre, S. Nomade, H. Guillou, P. Moska, K. Tudyka, T. Goslar, E. Chapron, A. Queffelec, G. Jouannic, C. Cortial, J.-P. Raynal, (2020) When did this happen? Late volcanic activity in Eastern Velay and Vivarais (France) revisited, submit, p.29.

M. Fouris (1989) Les sites villafranchiens du Devès et les basaltes de la vallée de l'Allier : application de la méthode K-Ar. Thèse n° 129, Université Blaise Pascal, 206 p.

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, pp. 83–90.

B. Hugo (1959) L'aménagement hydro-électrique du bassin de l'Ardèche in: Revue de géographie de Lyon, vol. 34, n°2, pp. 113-139.

J.-L. Jourde, G. Vignal et F. Eyraud (2015) Aménagement hydro-électrique du lac d'Issarlès in: Les cahiers du Mézenc numéro 25, Juillet, pp. 69-78.

E. Juvigné, A. Stach-Czerniak (1998) Etude sédimentologique et palynologique des dépôts lacustres tardiglaciaires et holocènes du Gour de Tazenat (Massif Central, France) in: Quaternaire, vol.9, numéro 1, Hommes et volcans, pp. 15-23.

A. Lami, F. Niessen, P. Guilizzoni, J. Masferro et C. Belis (1994) Palaeolimnological studies of the eutrophication of volcanic Lake Albano (Central Italy) in: Journal of Paleolimnology 10, pp. 181-197.

P. Mazzanti, F.V. De Blasio (2010) Peculiar Morphologies of Subaqueous Landslide Deposits and Their Relationship to Flow Dynamics in: Submarine Mass Movements and Their Consequences, 141 Advances in Natural and Technological Hazards Research, Vol 28, pp. 141-151

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, pp. 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, pp. 29-52.

M. Meybeck (2019) Les dégazages ignorés du Pavin, le terrifiant lac-maar d’Auvergne in : Géochroniques n° 150, Printemps 2019, 9 p.

D. Miallier (2020) Variations récentes de niveau du lac Pavin : essai de mise en cohérence des différentes sources d’information in: BSGF – Earth Sciences Bulletin 191-4, 17 p.

S. Nomade, D. Genty, R. Sascio, V. Scao, V. Féruglio, et al. (2016) A 36,000Year-Old Volcanic Eruption Depicted in the Chauvet-Pont d’Arc Cave (Ardèche, France)? in: PLoS ONE, Public Library of Science, 11, 10 p.

L. Provencher et J.-M. M. Dubois (2010) Proposition d'une nomenclature géomorphologique du rivage lacustre et comparaison avec les rivages côtiers et fluviaux in: La société provancher d’histoire naturelle du Canada, Le naturaliste canadien 134 numéro 1 pp. 90-96.

J.-P. Raynal et Guy Kiffer (2001) De l'éruption à l'objet préhistorique en Velay, France in: Acte de symposium 15.2 organisé par la Commission 31 de l'Union des sciences Préhistoriques et Protohistorique dans le cadre du XIV^{ème} congrès, Belgique pp. 31-40.

J.-P. Raynal et E. Defive (2019) Qui a vu quoi ? Un essai de calendrier éruptif pour Néanderthal et Sapiens en Velay-Vivarai, in: Bulletin spécial Géoparc Mondial UNESCO, Société Géologique d'Ardèche, Bulletin numéro 12, Avril, pp. 21-36.

K. K. Serieyssol, Aude Beauger, Yannick Miras, Léo Chassiot, Victor Arricau et Emmanuel Chapron (Préparation) Water chemistry, landscape and landuse changes recorded by diatom and pollen in Lake Pavin over its approximate 7000-year history, 27p.

M. Tchindjang (2018) Lake Nyos, a Multirisk and Vulnerability Appraisal in: Geosciences 2018, 8, 28 p.

N. Thouveny, J.-L. de Beaulieu, E. Bonifay, K.M. Creer, J. Gulot, M. Icole, S. Johnsen, J. Jouzel, M. Reille, T. Williams et D. Williamson (1994) Climate Variations in Europe over the past 140 kyr deduced from rock magnetism in: Nature, 371, pp. 503-506.

L. Touchart (1993) La machine lacustre : l'exemple du Léman in: Annales de Géographie, 102(573), pp. 449-471.

L. Touchart (2000) Qu'est-ce qu'un lac ? (What is a lake?) in: Bulletin de l'Association de géographe français, 77^{ème} année, 2000-4 (décembre), Géographie des lacs/Thème de géographie tropicale, pp. 313-222.

J. O.Veatchet C.R. Humphrys (1964) Lake terminology. Department of Resource Development, Agricultural Experiment Station, Michigan State University, East Lansing, Water Bulletin numéro 14, 271 p.

A. Valentine, J. Briner, B. Van Wyk de Vries, E. Macorps, D. Gump (2019) ¹⁰Be exposure ages for the Late Pleistocene Gour de Tazenat maar (Chaîne des Puys volcanic field, Auvergne, France) in: Quaternary Geochronology 50 (2019), pp. 8-13.

S. Van-Wierts, P. Bernatchez, C. Larouche (2017) Suivi topographie côtier au moyen d'un système Lidar mobile terrestre : exemple d'une recharge sédimentaire de plage in: Géomatica Volume 71, Numéro 4, pp.194-212.

Annexes

Annexe 1 : Gravures présentant le lac Pavin, l'exutoire et le MontChal (Chapron et al. In preparation)	91
Annexe 2 : Profil sismique haute résolution (3,5 kHz) de deux maars récents ; a) Profil du lac Nyos de K. Kelts, 1991 (modifié d'après Chapron et al.,2010) ; b) Zoom sur une section d'un profil du lac Pavin ; c) Photographie du roll over 8 jours après l'éruption de 1986 par United States Geological Survey.	92
Annexe 3 : d'après Chapron et al (en préparation) a) Photographie prise pendant les travaux EDF montrant les berges aménagées en chemin ou lieu de pâturage/transhumance (b) ; c) Rive du lac d'Issarlès en 2017, d) Conduite souterraine à -50 mètres.....	92
Annexe 4 : Coupe altimétrique de l'ensemble des aménagements modifiant le bassin versant du lac d'Issarlès suite aux travaux EDF de 1947 à 1954, d'après Jourde et al., 2015	93
Annexe 5 : Carte de l'Etat-Major positionnant le niveau du lac sous 639 mètres	94
Annexe 6 : Tableau regroupant les données utilisées.....	95
Annexe 7 : Coupe géologique du complexe Pavin-Montchal avec le creux de Soucy, modifié d'après les travaux de Meybeck 2016 et Glangeaut 1916.....	96
Annexe 8 : Ensemble des carottes contenant des traces de dépôt d'éruption limnique (LED) qui sont des petits glissements de terrain subaquatique riche en oxyde de fer et carte des pentes et d'épaisseur des dépôts montrant le glissement des LED du plateau subaquatique au fond du lac par le biais de canyon (Arricau, 2019)	97
Annexe 10 : Coupe de l'entrée du lac Pavin en 1909 avec le paléodelta à 4,84 mètres d'altitude (Miallier, 2020)	99
Annexe 11 : (Chapron et al in prep) Développement de la pisciculture, route d'accès et chemin montrant des projets d'aménagements mais un niveau de lac stable depuis le XVIII ^{ème} (Meybeck, 2016 et Miallier, 2020).....	100
Annexe 12 : Carte des bassins versants sous contrat, Contrat territorial de la Couze Pavin de 2017 établi par le parc naturel régional des volcans d'Auvergne.	101

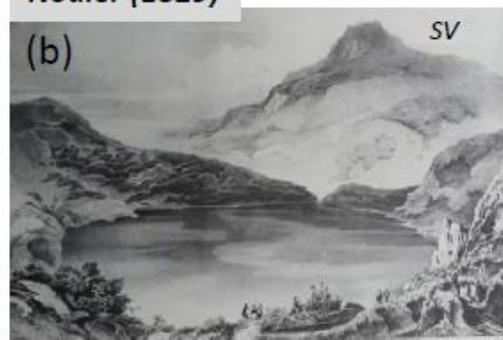
Annexe 13 Courbe des pentes du gour de Tazenat (Figure 37 a) avec la présence de deux paliers plats à 14 et 37 mètres ainsi qu'un adoucissement léger des pentes à 25 mètres..... 102

Annexe 14 : Carte des pentes en degrés du cratère du Pavin avec en noir le niveau 0 du lac ainsi que les chemins IGN et les isolignes d'anciens niveaux lacustres..... 103

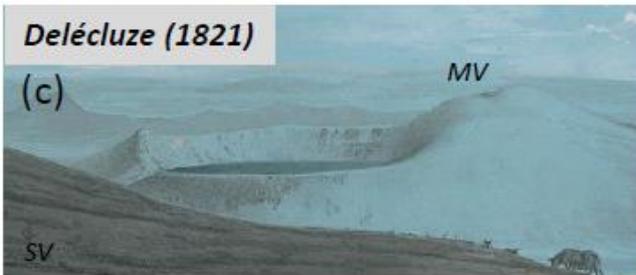
Belleforest & Thevet (1575)



Nodier (1829)



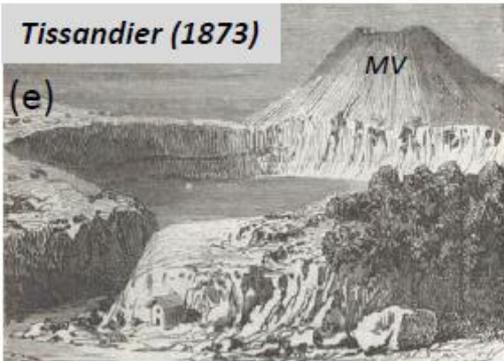
Delécluze (1821)



Lecoq (1835)



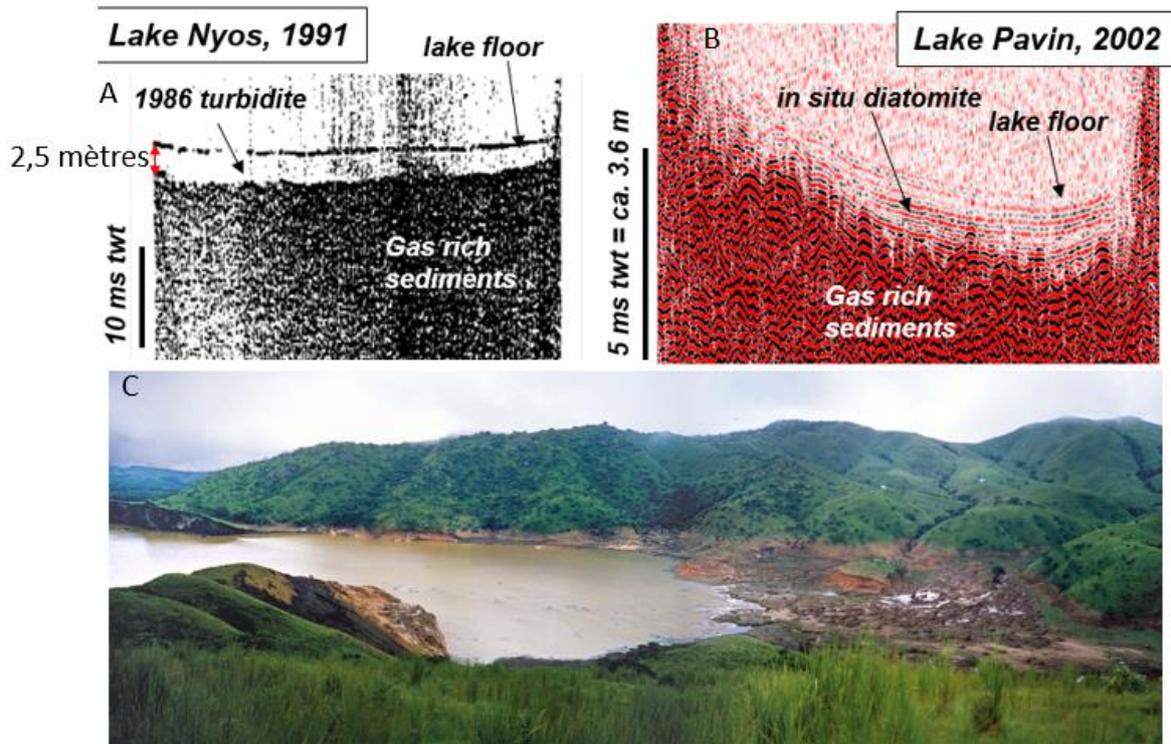
Tissandier (1873)



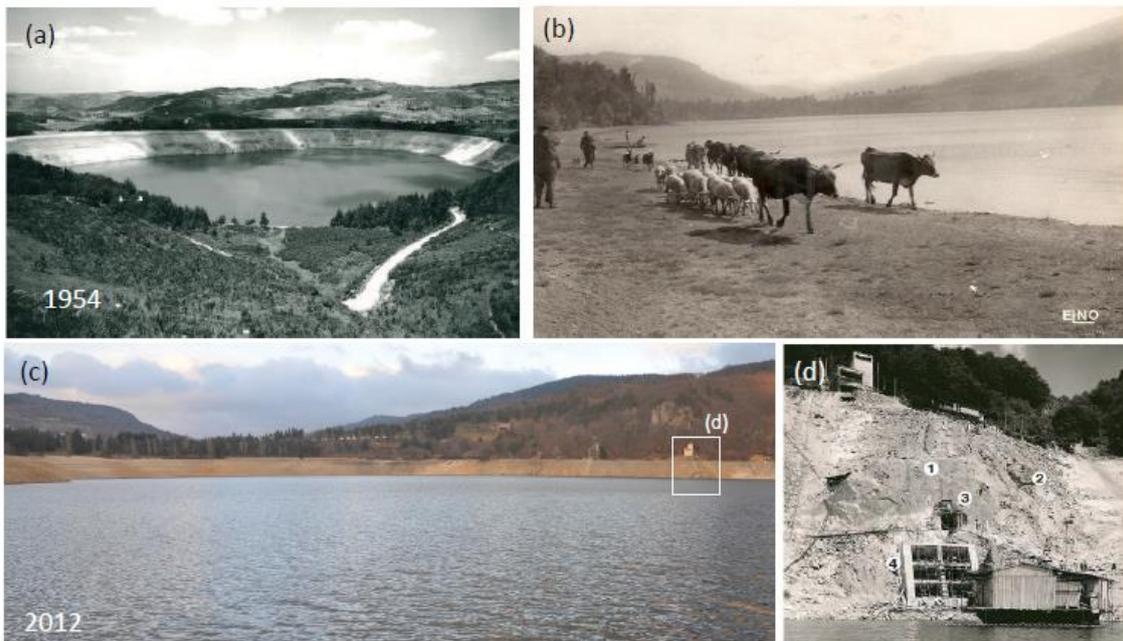
Lecoq (1835)



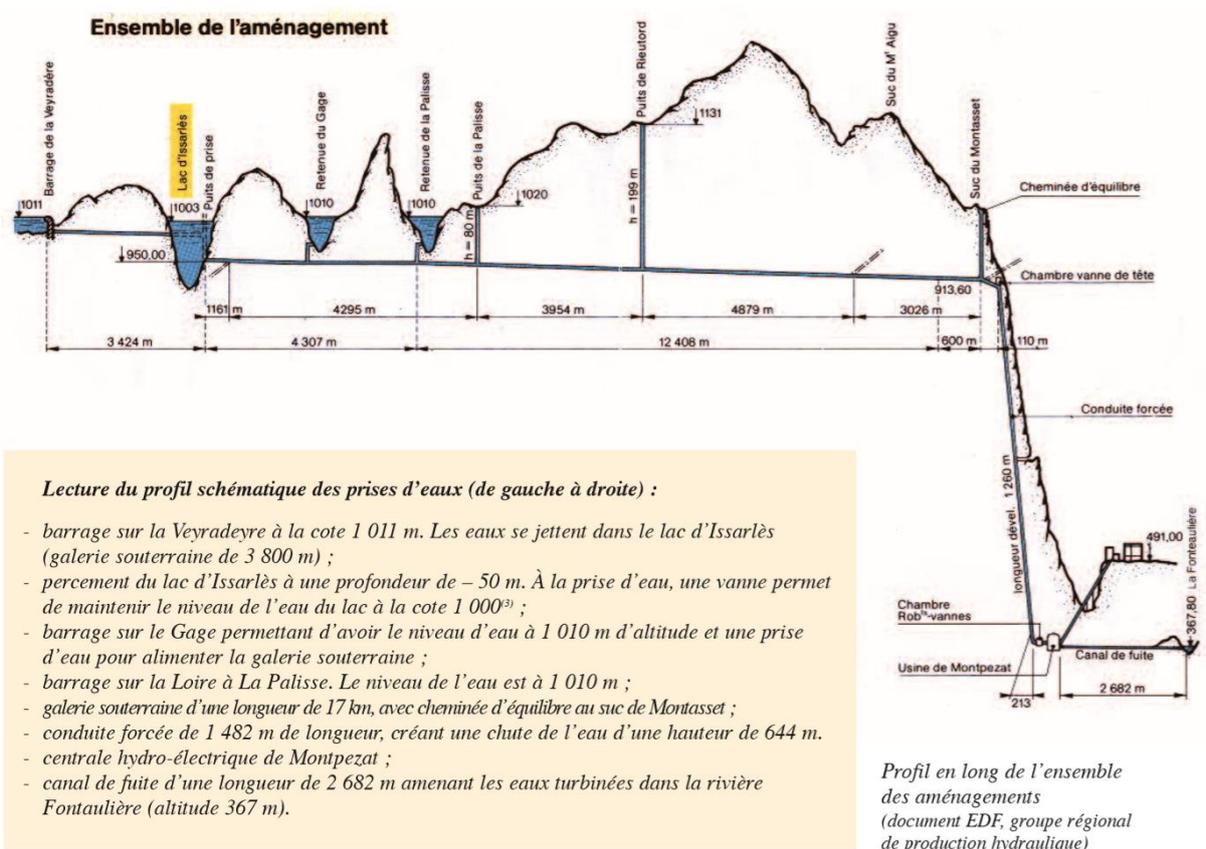
Annexe 1 : Gravures présentant le lac Pavin, l'exutoire et le MontChal (Chapron et al. In preparation)



Annexe 2 : Profil sismique haute résolution (3,5 kHz) de deux maars récents ; a) Profil du lac Nyos de K. Kelts, 1991 (modifié d'après Chapron et al., 2010) ; b) Zoom sur une section d'un profil du lac Pavin ; c) Photographie du roll over 8 jours après l'éruption de 1986 par United States Geological Survey.



Annexe 3 : d'après Chapron et al (en préparation) a) Photographie prise pendant les travaux EDF montrant les berges aménagées en chemin ou lieu de pâturage/transhumance (b) ; c) Rive du lac d'Issarlès en 2017, d) Conduite souterraine à -50 mètres.



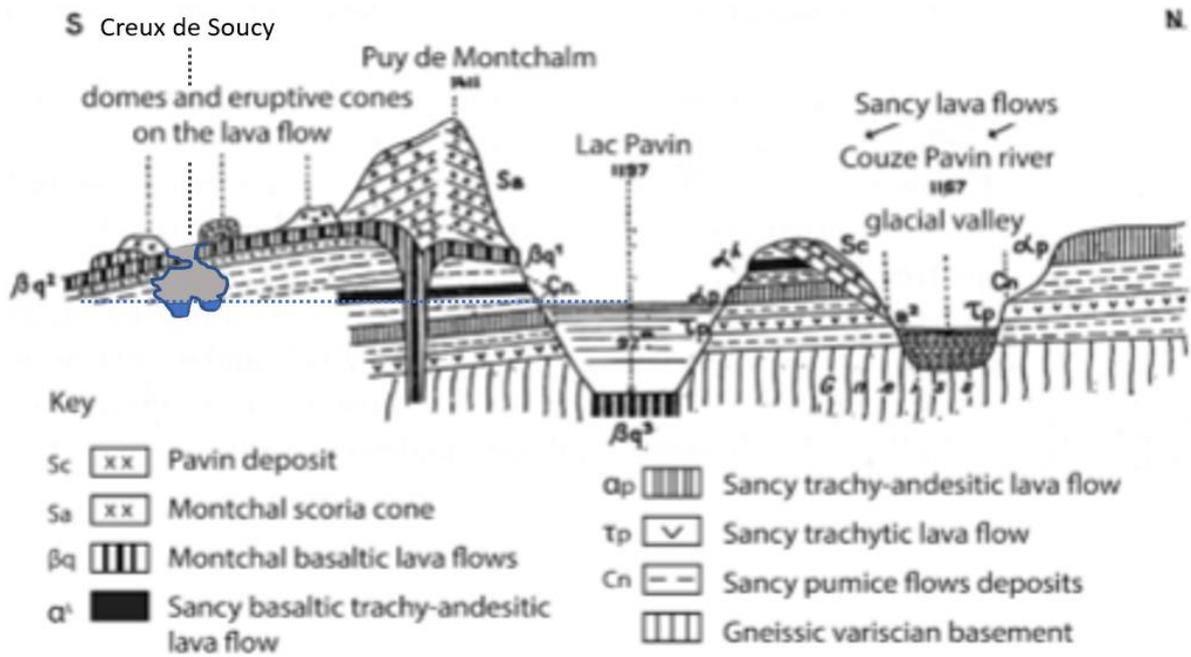
Annexe 4 : Coupe altimétrique de l'ensemble des aménagements modifiant le bassin versant du lac d'Issarlès suite aux travaux EDF de 1947 à 1954, d'après Jourde et al., 2015



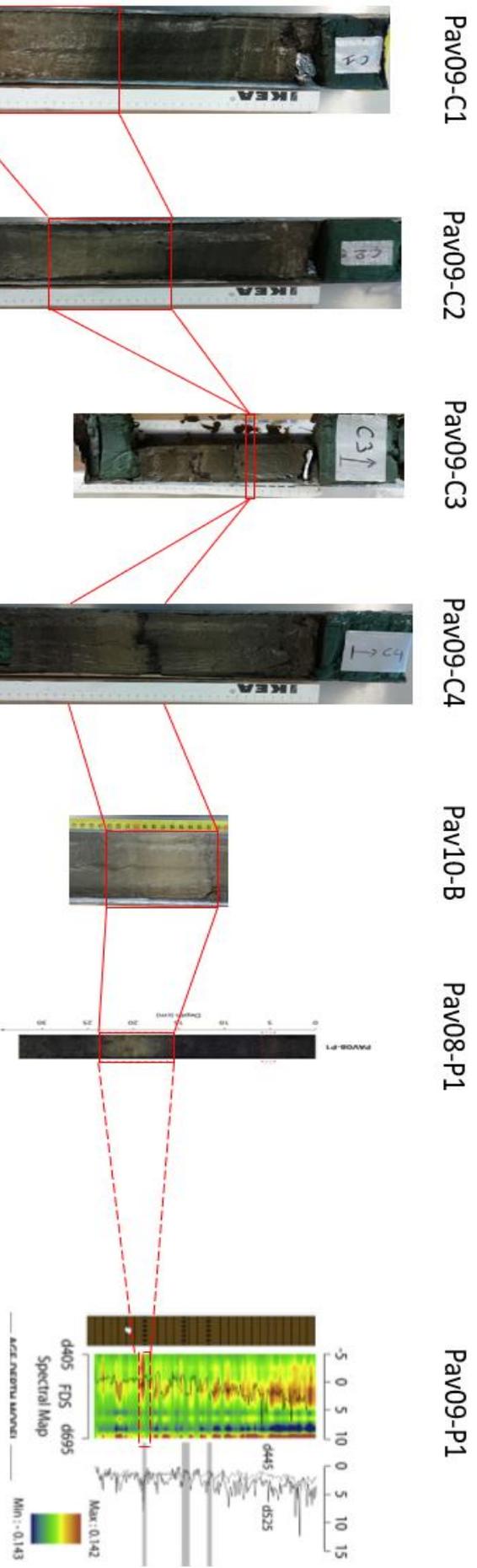
Annexe 5 : Carte de l'Etat-Major positionnant le niveau du lac sous 639 mètres

Maar	Issarlès	Pavin	Tazenat
Bathymétrie	108 Mètres	92 Mètres	67 Mètres
IGN 1 Mètre	X	O	O
Lidar	O	X	X
Delebecque	X	O	X
Sismique	X	O	X
Multifaisceaux	O	X	O
Modèle 3D	X	X	X
Carotte	Coûteau (1981)	2008 (Pav-08) 2009 (Série Pav-09) 2010 (Série Pav-10) 2012 (Série Pav-12)	TA-94 TA-17
C14	O	X	X
Palynologie	X	X	X
Sédimentologie	X	X	X
Peinture	O	X	O
Texte	X	X	O
Photographie	X	X	X
Instrumentalisation	O	X	O

Annexe 6 : Tableau regroupant les données utilisées

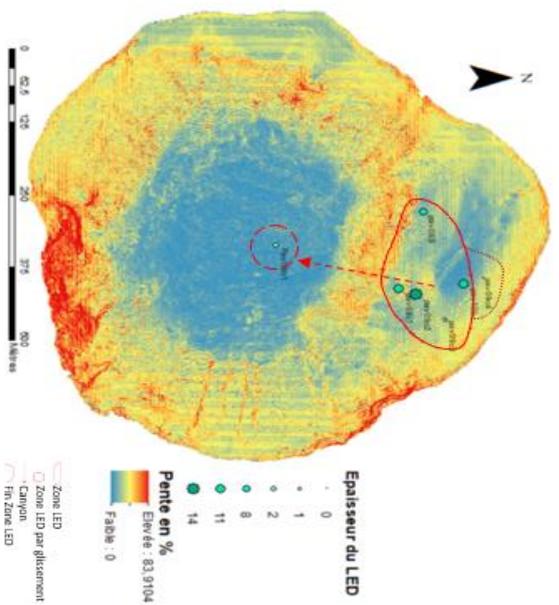


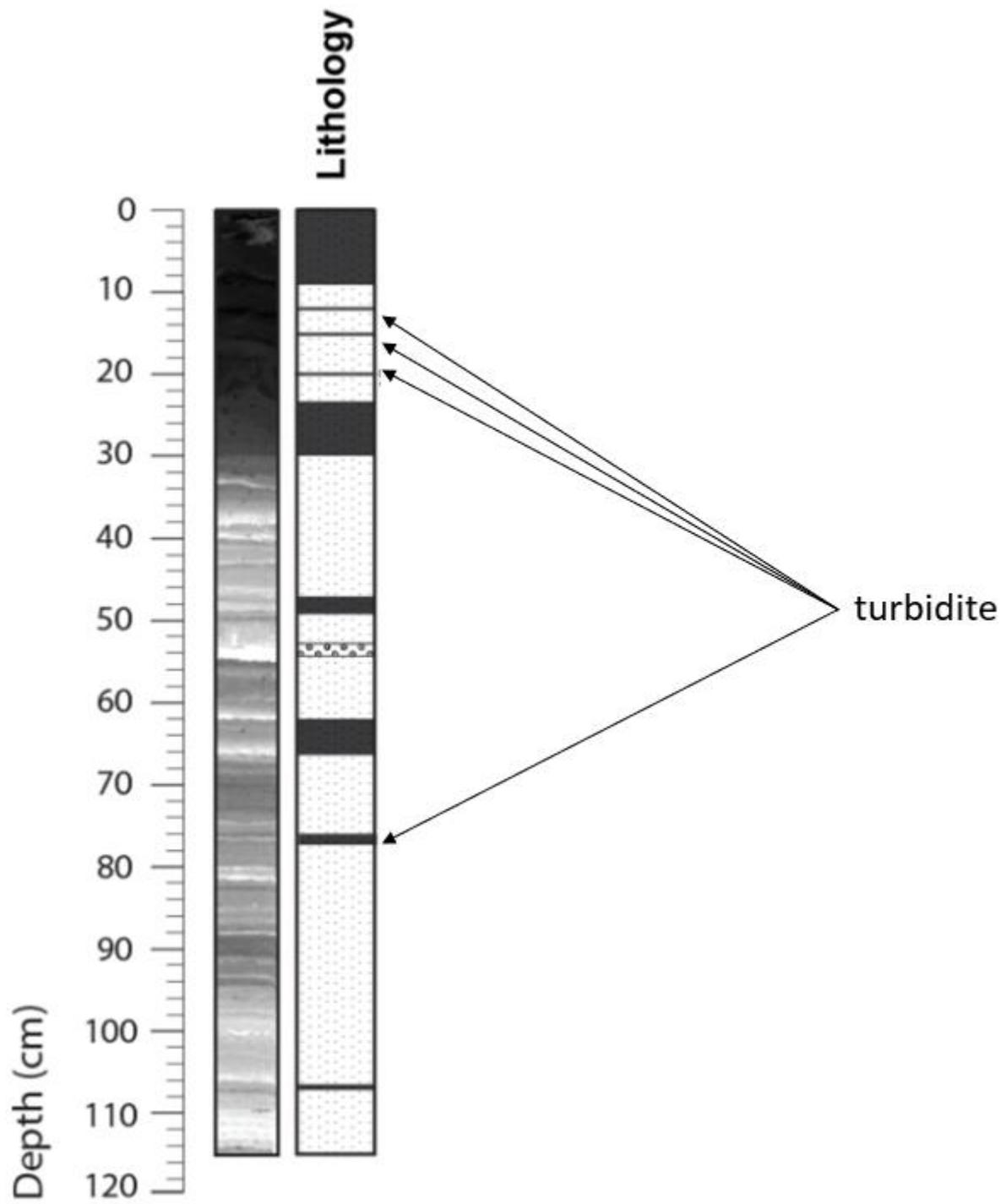
Annexe 7 : Coupe géologique du complexe Pavin-Montchal avec le creux de Soucy, modifié d'après les travaux de Meybeck 2016 et Glangeaut 1916



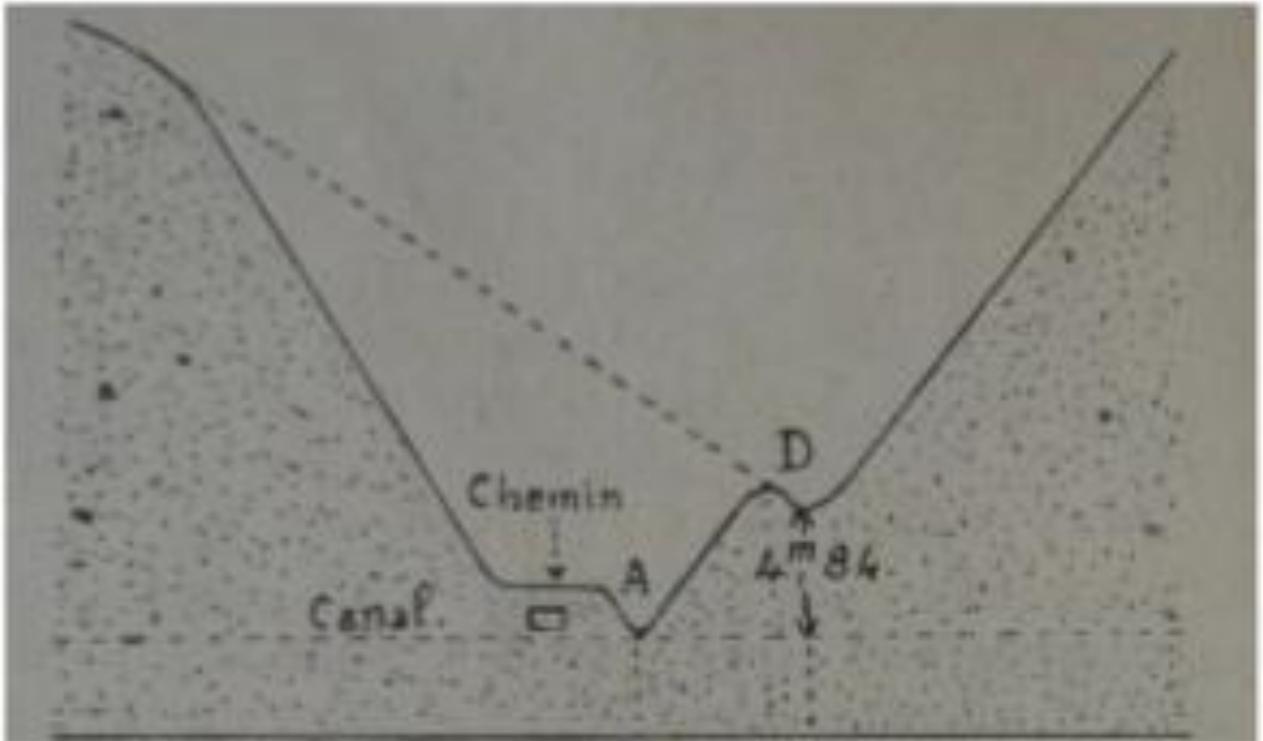
- LED
- Limite de LED

Annexe 8 : Ensemble des carottes contenant des traces de dépôt d'éruption limnique (LED) qui sont des petits glissements de terrain subaquatique riche en oxyde de fer et carte des pentes et d'épaisseur des dépôts montrant le glissement des LED du plateau subaquatique au fond du lac par le biais de canyon (Arricau, 2019)

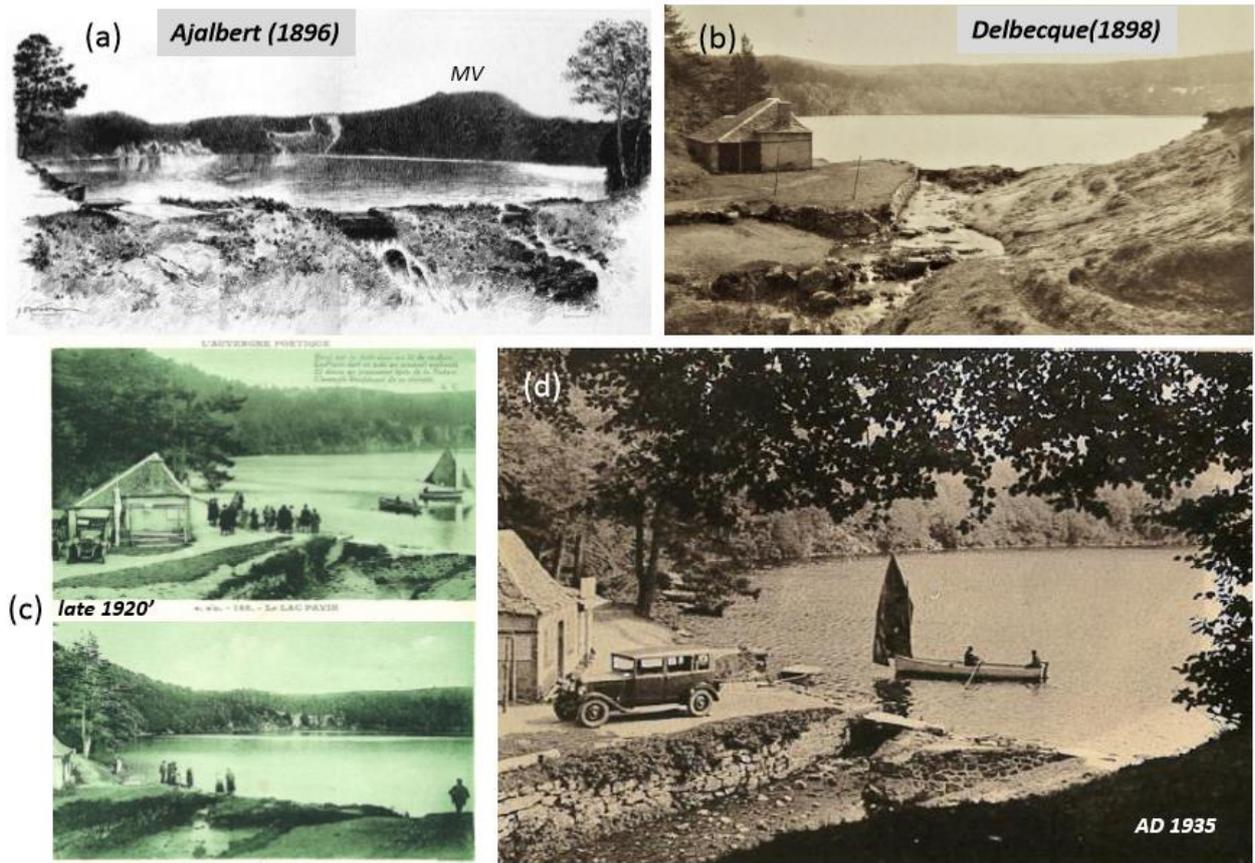




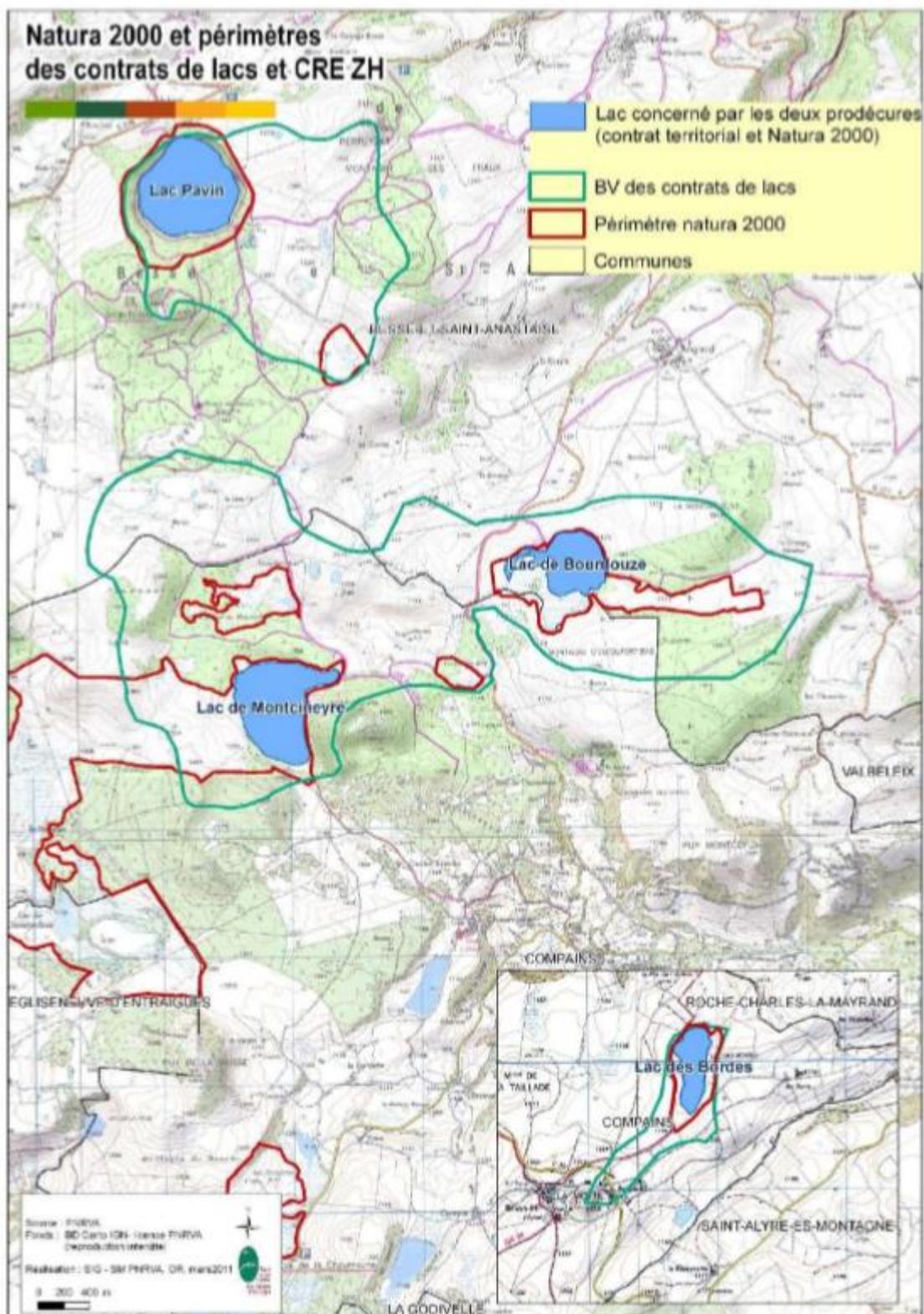
Annexe 9 : Carotte TA-17 montrant les turbidites



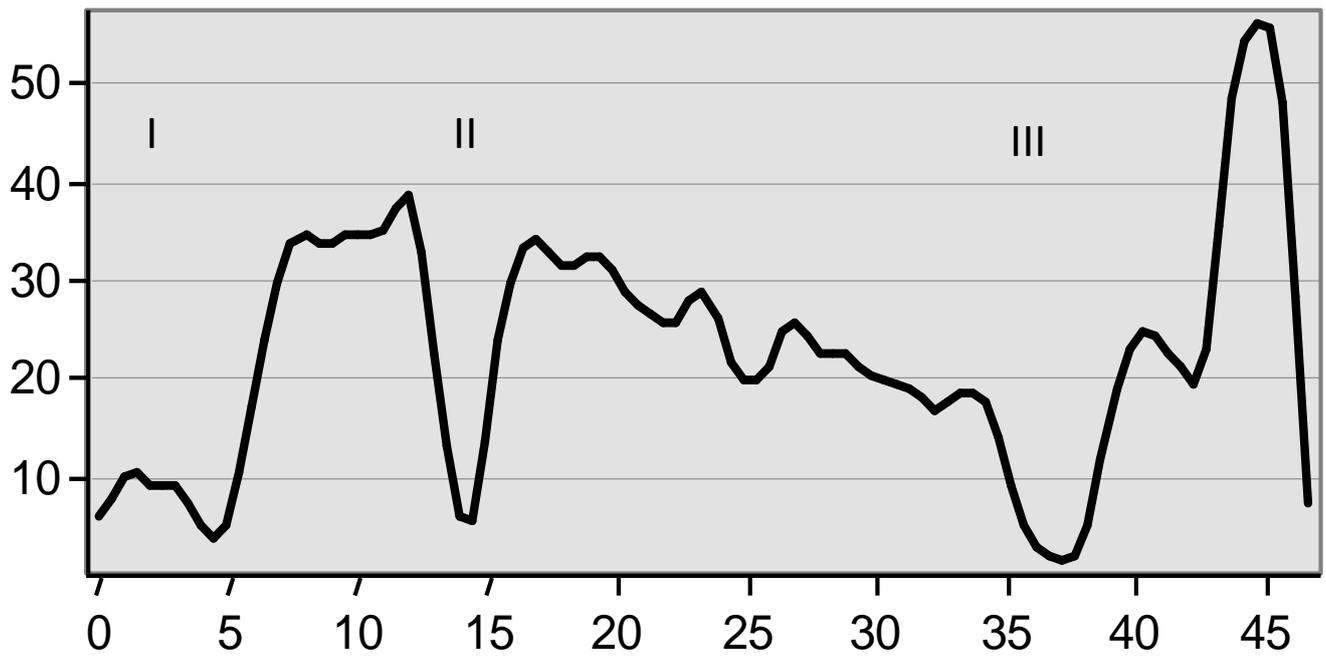
Annexe 10 : Coupe de l'entrée du lac Pavin en 1909 avec le paléodelta à 4,84 mètres d'altitude (Miallier, 2020)



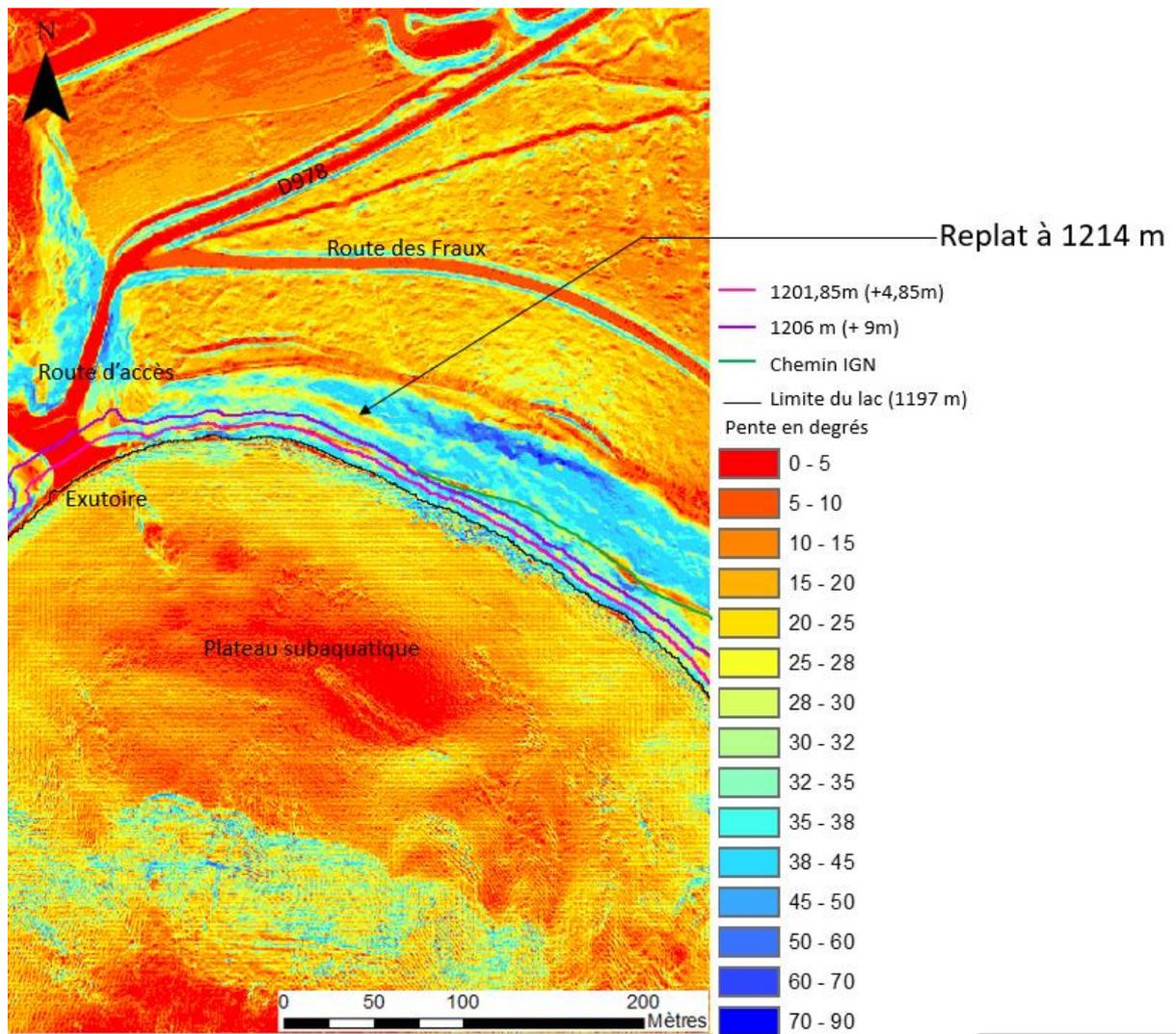
Annexe 11 : (Chapron et al in prep) Développement de la pisciculture, route d'accès et chemin montrant des projets d'aménagements mais un niveau de lac stable depuis le XVIII^{ème} (Meybeck, 2016 et Miallier, 2020).



Annexe 12 : 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 13 Courbe des pentes du gour de Tazenat (Figure 37 a) avec la présence de deux paliers plats à 14 et 37 mètres ainsi qu'un adoucissement léger des pentes à 25 mètres.



Annexe 14 : Carte des pentes en degrés du cratère du Pavane avec en noir le niveau 0 du lac ainsi que les chemins IGN et les isolignes d'anciens niveaux lacustres