

**Caractérisation géomorphologique de lacs de montagne
emblématiques des Alpes occidentales, du Massif central et
du Nord des Pyrénées**

Rédigé par :

Lorène Scabello

22018567



Lac d'Oô, Léa Scabello, 2024

Encadré par :

Emmanuel Chapron – Enseignant-chercheur (GEODE – UT2J, Toulouse)

Année 2023 - 2024

Table des matières

Introduction	7
I) Contexte du stage	10
1) Présentation du laboratoire : GEODE	10
2) Présentation des missions	11
3) Présentation des zones d'étude : contexte géographique, géologique et anthropique..	14
II) Cadre théorique	21
1) Etat de l'art : les environnements lacustres et leurs littoraux	21
a) La limnologie	21
b) Typologie des lacs	21
c) La géomorphologie des littoraux lacustres	22
d) Les aléas et risques en zones lacustres	25
2) Etat de l'art : les technologies utilisées	26
III) Cadre méthodologique	28
1) Collecte des données et traitement des données	28
Collecte des données	28
Sédimentologie : carottage, échantillonnage, et datation	28
2) Méthodologie de la cartographie topo-bathymétrique et géomorphologique des lacs.	30
Les logiciels utilisés	30
Création des Modèles Numériques de Terrain : les cartes topo-bathymétriques des lacs et les MNT des bassins versants	30
Création des cartes géomorphologiques des environnements lacustres	33
IV) Résultats	34
1) Le lac du Bourget : un grand lac de vallée glaciaire, et son paléoenvironnement	34
2) Le lac de maar d'Issarlès : un système lacustre alimenté par des cours d'eau torrentiels	37
3) Les lacs pro-glaciaires de la Neste d'Oô : lac d'Oô, lac d'Espingo et lac Saussat	40
V) Discussion	47
1) Critiques et perspectives	47
2) Retour d'expérience	48
3) Liens avec le master	49
Conclusion	49
Bibliographie	51
Annexes	57

Index des figures	69
Index des annexes.....	69

Remerciements

J'aimerais avant tout remercier mon tuteur, Emmanuel Chapron, qui durant tout mon stage m'a soutenue et encouragée dans mes avancées, malgré mes moments plus compliqués. Merci à lui pour sa confiance et son optimisme, qui m'ont permis d'évoluer et de m'insérer pleinement dans mon travail au sein du laboratoire GEODE malgré ma timidité. C'est notamment grâce à lui que j'ai pu découvrir une partie de la France, l'Ardèche, avec une belle équipe de scientifiques. Un dernier grand merci de m'avoir donné cette opportunité de découvrir plus en détails le monde étrange et passionnant de la recherche, mais surtout, d'avoir supporté mon humour décalé durant ces 4 mois.

Je tiens à remercier Hugues Barcet, pour son efficacité et sa réactivité lorsque j'ai rencontré des soucis techniques liés à l'informatique.

Emmanuelle Defive, cette géomorphologue enthousiaste et passionnée, qui m'a convaincue qu'être géographe est probablement le plus beau métier du monde. Merci à elle pour son regard aiguisé sur l'environnement qui l'entoure, me confirmant que je suis sur la bonne voie.

Une pensée à mon camarade d'études et de galères de Lidar, Damien, avec qui le traitement fastidieux et interminable de ses données s'est révélé plus sympathique et détendu que prévu.

Merci à Clarisse mon amie de toujours et support moral quotidien, qui bien qu'elle soit à l'autre bout de Toulouse, a toujours trouvé le temps de me rappeler que j'avais largement les capacités pour réussir. Elle s'est révélée être un exemple de persévérance et de motivation, via l'implication et sa passion pour ses études (future médecin ce n'est pas rien).

Un grand remerciement à mes parents et mes sœurs, qui malgré le fait qu'ils soient incapables de retenir le sujet de mon stage, croient en moi aveuglement.

Merci à Mathilde et Célia, à cause ou grâce auxquelles je n'ai jamais autant mangé de falafels sur les dalles du Mirail, moments de break inégalables sous les UV.

Et enfin, un grand merci à Japhet, mon voisin et acolyte de révolte, de m'avoir changé les idées en me sortant au soleil pour de joyeuses sessions de skate sur le macadam, et d'avoir lutté avec moi dans ces contextes politiques destabilisants.

Bien que ce ne soit qu'un mémoire de master 1, j'ai beaucoup de monde à remercier, monde qui m'a énormément motivé et donné l'impulsion pour finir ce que j'avais commencé.

Résumé

Les lacs sont de véritables archives environnementales. Issus de divers processus hydrologiques, géologiques et géomorphologiques, les systèmes lacustres s'insèrent dans la compréhension de l'évolution environnementale du local au global. Qu'importe le type de lac, les dynamiques littorales sont quant à elles diverses et variées, et dépendent avant tout du milieu dans lequel ils se trouvent (contexte géologique, géographique, géomorphologique anthropique). Ainsi, l'étude des formations géomorphologiques littorales est un pan à part entière, entre milieu terrestre et milieu aquatique. La cartographie de ces zones se révèle être une façon pour mieux les appréhender, et prendre du recul. Ainsi, à l'aide de multiples technologies tels que le lidar, les sondeurs multifaisceaux, la sismique réflexion, ou encore des images satellites et photos aériennes, notre travail durant ce stage s'est attaché à cartographier 5 lacs français, d'origine et de taille différentes.

Nous avons les trois petits lacs proglaciaires de la Neste d'Oô, le lac d'Oô, le lac d'Espingo et le lac Saussat, situés dans un fort contexte montagnard dans les Pyrénées ; le lac d'Issarlès qui est un lac de maar, donc volcanique dans le Massif central, et enfin le grand lac de vallée glaciaire aux pieds des Alpes, le lac du Bourget.

Réalisé au sein du laboratoire de GEODE (Géographie de l'environnement) à Toulouse, ce stage s'est centré sur l'étude de ces 5 lacs, eux-mêmes intégrés dans des projets de recherches variés (FACT, PAACTE, ZA PYGAR...), reliant des laboratoires de recherche éparpillés dans toute la France, nous avons étudié leurs systèmes géomorphologiques hétérogènes, et nous avons pu explorer le volet sédimentologique en reliant nos questionnements à la notion des risques et aléas naturels et / ou anthropiques. En effet, étant donné que les lacs sont de véritables archives environnementales, les événements y sont enregistrés. Mis en lien avec d'autres données historiques, nous pouvons ainsi retracer l'histoire des lacs et plus largement de leur bassin versant.

L'étude par la cartographie géomorphologique des lacs et de leurs littoraux s'est accompagnée d'une remobilisation de bases de données préexistantes, qui ont pu être étayées et complétées. Suivant des méthodes spécifiques selon les données et l'objectif à atteindre, nous avons détaillé nos cheminements et limites de travaux.

Mots-clé : géomorphologie, lacs montagnards, littoraux, cartographie, sédimentologie

Abstract

Lakes are true environmental archives, formed by various hydrological, geological, and geomorphological processes. Lake systems are essential to understanding environmental evolution, from local to global scales. Regardless of the type of lake, the dynamics of lake shorelines are diverse and vary depending on the surrounding environment (geological, geographic, geomorphological, and anthropogenic context). Thus, the study of shoreline geomorphological formations represents a unique field, bridging terrestrial and aquatic environments. Mapping these zones proves to be a valuable approach for better comprehension and broader perspective.

In this study, we used multiple technologies, including LiDAR, multibeam sonar, seismic reflection, satellite images, and aerial photography, to map five French lakes of varying origins and sizes. These include three small proglacial lakes along the Neste d'Oô – Lac d'Oô, Lac d'Espingo, and Lac Saussat, located in the mountainous Pyrenees region; Lac d'Issarlès, a volcanic maar lake in the Massif Central; and, finally, the large glacial valley lake at the foot of the Alps, Lac du Bourget.

Conducted within the GEODE (Geography of the Environment) laboratory in Toulouse, this study focused on these five lakes, each part of various research projects (FACT, PAACTE, ZA PYGAR...), involving research institutions across France. We examined their heterogeneous geomorphological systems and explored sedimentological aspects, linking our research questions to natural and/or anthropogenic hazards. Since lakes act as true environmental records, events are stored within them. When cross-referenced with other historical data, we can trace the history of these lakes and, more broadly, their watersheds.

The geomorphological mapping of the lakes and their shorelines also involved updating and supplementing pre-existing databases. By following specific methods based on the data type and the objectives, we documented our processes and limitations.

Keywords : geomorphology, mountains lakes, coastlines, cartography, sedimentology

Introduction

Les lacs de montagne naissent à l'issue de processus géomorphologiques, géologiques, hydrologiques, qui en font des environnements aquatiques spécifiques « *infiniment plus petits que l'océan mais beaucoup plus grand qu'un étang* » (Touchart, L., 1993). Les zones lacustres s'intègrent dans un système complexe en subissant les fluctuations de leur bassin versant, et sont ainsi de véritables archives environnementales permettant de remonter le temps à travers l'identification des modifications d'origine climatique, tectonique et anthropique (Chapron, 1999). L'étude des paléoenvironnements permet de traduire ces archives naturelles à partir d'analyses multi-proxy (palynologie, microfossiles, sédimentologie...). Chaque élément permet de reconstituer un bout de l'histoire du climat de la Terre, que ce soit à l'échelle locale ou globale. Ainsi, l'intérêt d'étudier les environnements lacustres est l'interaction de plusieurs facteurs déterminant la trajectoire évolutive de ces milieux aquatiques.

Dans notre étude, nous nous porterons une attention spécifique sur les particularités géomorphologiques d'une sélection de lacs de montagnes, et plus particulièrement de leurs littoraux. La géomorphologie est définie comme l'étude des « *formes du relief terrestre [...] Elle est au contact entre géologie, hydrologie, pédologie, agronomie et géographie des paysages* »¹. Science étudiant les formes du relief, leurs évolutions et mécanismes, elle permet donc de comprendre les processus interagissant les uns avec les autres tels que l'érosion et de définir le milieu (Fort et al 2015). Cette discipline est donc un prisme de compréhension des dynamiques passées et présentes de nos environnements, mais aussi des trajectoires évolutives de la géomorphologie subaquatique avec l'interface terre - lac.

Tout comme les plans d'eau maritimes, les lacs disposent de littoraux, qui sont l'interface entre « *l'hydrosphère, l'atmosphère et la lithosphère* ».² Ces littoraux fluctuent en subissant les dynamiques climatiques et anthropiques notamment avec des aménagements côtiers (plage, ports, habitats...). Ainsi, les littoraux lacustres ne sont pas figés dans le temps et déterminent parfois l'installation des sociétés humaines. Les littoraux des lacs de montagnes présentent des caractéristiques très variées selon la topographie du milieu, la nature géologique et les aménagements anthropiques du bassin versant, ce qui induira des littoraux diversifiés que l'on détaillera plus tard. Tout comme il existe des littoraux divers et variés, la typologie des lacs est tout aussi riche selon les milieux rencontrés. Qu'ils soient d'origine glaciaire, volcanique, tectonique ou anthropique, les lacs font face à une pluralité d'aléas, et de risques. En effet, les environnements lacustres dans leur diversité présentent un certain nombre d'aléas pouvant impacter de façon plus ou moins significative le milieu. Attachons-nous tout d'abord à définir la notion de risque. Ce terme peut être défini par la

¹<https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/geomorphologie>

²<https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/littoral>

« possibilité qu'un aléa se produise et touche une population vulnérable à cet aléa »³. Ainsi, un risque « naturel » est l'interface entre plusieurs éléments :

- Le **géosystème**, qui correspond aux aléas « naturels », donc aux phénomènes naturels qui se déroulent dans un environnement donné, à une fréquence plus ou moins importante
- La **société**, et donc du contexte culturel notamment à travers la perception des sociétés des aléas et leur niveau de connaissances de ces derniers
- Le **territoire**, avec les endommagements potentiels et la vulnérabilité des populations locales face aux aléas.

L'interaction entre ces éléments permet mesurer le risque. Cette interface nature / société évolue dans le temps, en fonction de l'occupation des sols, et donc à l'exposition des sociétés face aux aléas. De plus, nous pouvons quantifier ces phénomènes sur la base de leur intensité et de leur fréquence. Il en découle alors des enjeux territorialisés relatifs à la vulnérabilité, et quantifiables (vies humaines, patrimoines, bâtis, impacts sur l'économie...).

Le milieu montagnard est « prédisposé » aux aléas « naturels » extrêmes. En effet, l'altitude et la topographie sont des éléments jouant un rôle d'accélérateur avec la gravité notamment. De plus, l'anthropisation des milieux joue sur l'intensité des phénomènes, comme la dégradation du couvert végétal et donc une augmentation des phénomènes érosifs, des glissements de terrain, ou encore des crues torrentielles (Chapron, 1999). Ces événements vont donc avoir des effets sur la géomorphologie des paysages, et donc des lacs.

Tout comme pour la typologie des lacs, et de leurs littoraux, nous dresserons une typologie des risques auxquels sont exposés les environnements lacustres de montagne dans la partie II) 1).

Nous nous pencherons sur les géomorphologies lacustres et terrestres, d'origine anthropiques et / ou climatiques dans des lacs d'origine variée situés sur le territoire français, dans les Pyrénées, le Massif central et dans les Alpes. L'étude menée ne représente qu'un échantillon de la complexe diversité sédimentaire, géologique et géomorphologique des environnements lacustres selon leur origine, taille, profondeur, et usages. A partir de différentes méthodes, nous nous attacherons donc à étudier les contextes géomorphologiques de nos zones d'études, subissant des dynamiques érosives plus ou moins importantes d'origine anthropique ou climatique au fil du temps. Nous nous appuyerons sur les outils cartographiques avec la création de Modèles Numériques de Terrain (MNT) afin de réaliser des cartes géomorphologiques (terrestres et subaquatiques). Pour se faire, j'ai dû remobiliser des bases de données préexistantes (lignes sismiques réflexion, données bathymétriques,

³ <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/risque-s>

carottes sédimentaires, LIDAR) tout en l'étoffant avec des images satellites, des photos aériennes d'archive, ou encore des fouilles archéologiques subaquatiques.

C'est dans le cadre du Master 1 – Gestion et évaluation des environnements montagnards que ce stage a été réalisé au sein du laboratoire GEODE (Géographie de l'Environnement) de l'Université Toulouse Jean Jaurès, sous la tutelle d'Emmanuel Chapron, sédimentologue dont les travaux de recherche s'articulent autour de la question des changements environnementaux et l'identification des forçages climatiques et / ou anthropiques sur les dynamiques des remplissages sédimentaires dans les environnements subaquatiques tels que les lacs (artificiels et naturels), en milieux montagnards⁴.

Ce mémoire a pour objectif de répondre à la problématique suivante :

Dans quelles mesures les changements climatiques et les activités anthropiques sont-ils des facteurs d'évolution et d'influence des dynamiques géomorphologiques des milieux lacustres en milieu montagnard et quels sont les potentiels risques / aléas associés ?

C'est à travers 5 parties que nous explorerons les réponses à cette problématique. Dans un premier temps, nous détaillerons le contexte du stage, notamment avec une description de la structure, les missions dans lesquelles s'imbriquent mon travail. Puis, une présentation de mes secteurs d'étude sera exposée.

Dans un second temps, nous élaborerons le cadre théorique en dressant une vue d'ensemble des milieux littoraux lacustres, mais plus amplement de la limnologie, des risques et aléas, et des usages anthropiques dans nos lacs. Puis nous passerons dans un volet plus technique, avec le détail des méthodes utilisées pour extraire et intégrer les données mobilisées.

La troisième partie s'attachera à développer le cadre méthodologique de la réalisation des cartes géomorphologiques de nos lacs, mais également de la partie terrain avec les démarches mises en place que nous avons suivi pour élaborer une étude paléoenvironnementale plus poussée.

L'avant-dernière partie exposera quant à elle les résultats obtenus ainsi que leur analyse, en mettant en avant les différentes formes géomorphologiques lacustres, les évolutions des environnements sédimentaires des littoraux, ainsi que les limites que nous avons rencontrées.

Enfin, la dernière partie sera un retour général sur l'ensemble du stage, où nous aborderons les apports personnels et techniques de ce dernier. Nous aborderons le lien entre cette expérience et la formation du Master GEMO, notamment avec la remobilisation de

⁴ <https://geode.univ-tlse2.fr/accueil/personnel/emmanuel-chapron#/>

compétences acquises durant cette année. Puis nous proposerons des perspectives d'études pour nos zones de travaux.

I) Contexte du stage

1) Présentation du laboratoire : GEODE

La structure d'accueil est le laboratoire GEODE (Géographie de l'Environnement), situé dans la Maison de la Recherche à l'université Jean Jaurès. GEODE est un laboratoire rattaché au CNRS et à l'Université Toulouse 2. Il se divise en 3 axes : GEOPASSE (GEOhistoire, géoarchéologies et PALéoenvironnement : l'apport du passé à la compréhension des changements socio-environnementaux) ; DESTER (Dynamiques et Enjeux Socio-environnementaux des Territoires) ; ED2-ECMS (Environnement et développement durable). Caractérisé par une approche multi et interdisciplinaire, le laboratoire conjugue de multiples disciplines telles que les géosciences, l'écologie, la géographie physique géo-systémique, la géographie sociale, la géohistoire, la modélisation socio-spatio-temporelle, ou encore l'archéologie. Cette interdisciplinarité permet une meilleure appréhension des évolutions paysagères et environnementales, combiné avec l'aspect anthropique.

Ce stage a pu bénéficier de la plateforme « PANGEME », Paléoenvironnement, Géoarchéologie et Métrologie Environnementale. Cette plateforme rassemble les moyens techniques ainsi que les expertises du laboratoire en matière d'études, de suivis sur le long terme, de bancarisation et de reconstitution des dynamiques spatio-temporelles de l'environnement. Le volet sédimentologie est l'un d'eux, avec un équipement spécifique aux analyses sédimentologiques, mais aussi aux prélèvements des échantillons sédimentaires (via des carottes). Dans ce laboratoire, une chambre froide est destinée au stockage à 4°C et à la conservation des carottes de sédiments prélevées sur le terrain. Ainsi, pour extraire ces archives sédimentaires. Des zodiacs, des échosondeurs, ou différents types de carottiers (manuels / mécaniques) sont utilisables durant les travaux de terrain.

Situé au Sud-Ouest de Toulouse, la participation de GEODE à plusieurs dispositifs d'observation labellisés par l'INEE-CNRS est importante. En effet, les productions scientifiques diversifiées s'imbriquent dans la coordination de projets de recherche d'envergure, à l'échelle locale, nationale mais aussi européenne. Au début du stage la directrice du laboratoire était Vanessa Py, mais une nouvelle équipe de direction a été mise en place au cours de l'année 2024.

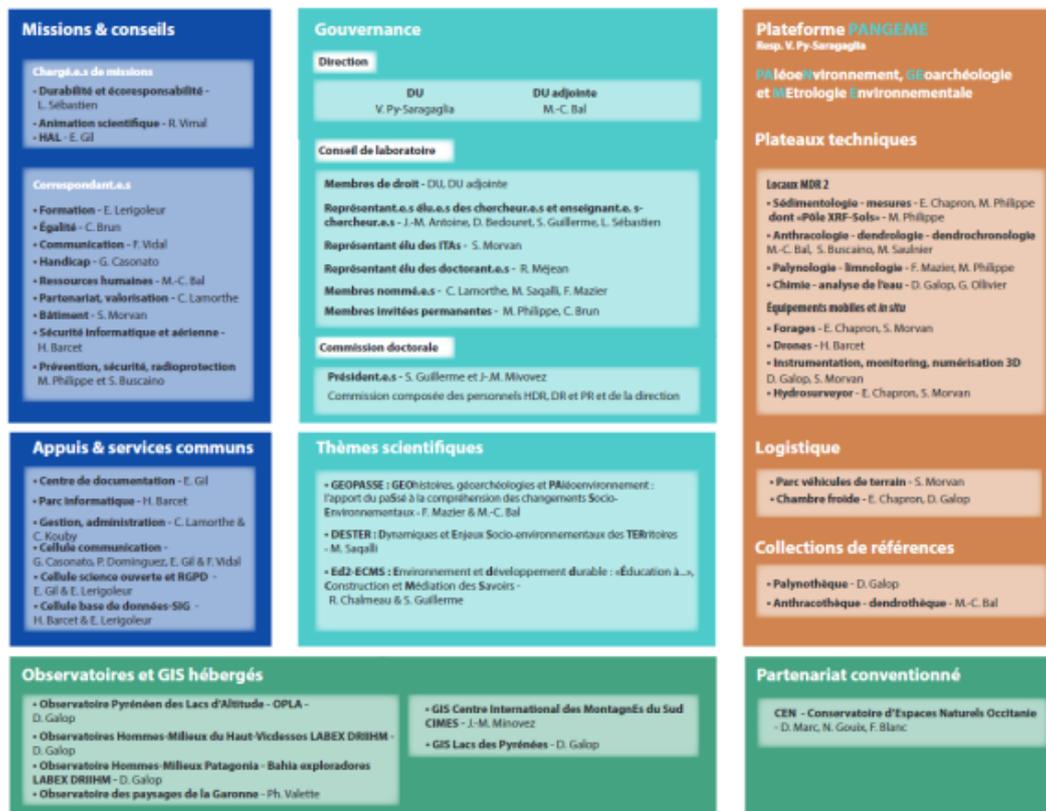


Figure 1: organigramme du laboratoire GEODE, source : UT2J

2) Présentation des missions

Les différents lacs étudiés s'intègrent dans des projets de recherche spécifiques. Ma principale mission a été d'étudier la géomorphologie des lacs, et de leurs littoraux, zones d'interface entre terre et milieu aquatique. C'est notamment via la cartographie que j'ai mené mon étude, en créant des cartes géomorphologiques et topobathymétriques de mes différents lacs. En effet, les lacs étudiés présentent des particularités distinctes, mais rassemblent également des points communs plus ou moins marqués, permettant de comparer ces différents milieux entre eux. Le travail cartographique effectué, plus la remobilisation et conjugaison de données préexistantes ont permis d'approfondir ma problématique et de mieux comprendre les dynamiques lacustres, en liant cela à la part du climat, des activités humaines et des risques naturels sur les changements environnementaux.

Description des projets dans lesquels s'imbriquent les missions :

- Projet PAACTE :

PAACTe est un projet interdisciplinaire participatif réunissant géographes, historiens, écologues, économiques, cartographes et s'attache à faire un diagnostic des premières formes de résiliences de la filière pastorale au sein des montagnes d'Occitanie., en réponse aux défis des changements climatiques et aux évolutions anthropiques. Le projet vise à évaluer les formes de résilience et leur impact sur les plans social, environnemental et économique, à différentes échelles (du local à l'international). Cette démarche permettra une meilleure compréhension de l'importance des activités pastorales occitanes et favorisera la recherche d'alternatives aux modèles actuels. Tous les aspects de la filière pastorale sont pris en considération, des pâturages jusqu'à la commercialisation des produits.

C'est dans le cadre de ce projet que je travaille sur le lac de Saussat dans la vallée de la Neste d'Oo, situé en Haute-Garonne, dans les Hautes-Pyrénées, ainsi que sur le lac Vert, plus à l'est, dans la Vallée du Lys, situé dans le même espace géographique et en amont de la confluence de la Pique avec la Garonne.

- Réseau Failles Actives France (FACT) :

En raison de l'héritage de son activité sismique, la France métropolitaine est aujourd'hui considérée comme une région continentale stable. Le programme FACT « Failles actives France » tente de mieux comprendre « *la sismicité associée aux failles actives en France et les processus à l'origine de cette sismicité, en constituant une base de données la plus complète possible des failles actives au Quaternaire* »⁵. Le programme FACT se répartit en 9 régions sur le territoire métropolitain, et regroupe des chercheurs.ses et expert.es en tectonique active ainsi que dans les méthodes qui lui sont associées. Mon travail sur le lac du Bourget (faille de Culoz et faille du Col du Chat) s'imbrique ainsi dans ce programme de recherche. Le programme FACT s'intègre dans les études de l'OREME, l'Observatoire de Recherche Montpellierain de l'Environnement, en lien avec le CNRS (Centre National de Recherche Scientifique), l'INRAE (Institut National de la Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement), l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) ainsi que l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire). De même, le lac d'Issarlès s'intègre également dans le projet Faille Active.

Le lac d'Oô fait également partie du programme FACT, en collaboration avec l'Université de Barcelone (en raison de la prolongation en France de la faille de Maladeta).

⁵ <https://data.oreme.org/fact/home>

- Zone Atelier PYGAR (ZA PYGAR)

L'étude du lac d'Oô s'intègre également dans la Zone Atelier Pyrénées Garonne (ZA PYGAR) du CNRS, regroupant 17 laboratoires de recherche dans la région toulousaine. Cette zone atelier s'attache à étudier les dynamiques spatio-temporelles des systèmes socio-écologiques. Cela comprend les interactions entre les systèmes sociaux en mutation et l'impact de ces derniers sur les systèmes écologiques. La résilience se place au cœur de la ZA PYGAR, afin d'approfondir les connaissances en termes d'adaptation et des temps de réponse des systèmes socio-écologiques face aux changements globaux. Étudiant les périodes du dernier maximum glaciaire jusqu'à l'époque actuelle, la ZA PYGAR se localise au sein du gradient amont-aval des Pyrénées jusqu'à la plaine de la Garonne.

Ainsi, l'étude du lac d'Oô est l'un des projets de la ZA PYGAR, GALAC d'Oo, travaillant sur la sensibilité du remplissage sédimentaire du Lac d'Oo aux changements environnementaux, tectoniques et aux activités hydroélectriques dans le bassin versant français montagnard de la Garonne. Le projet cherche à préciser la part du climat et de la tectonique, mais aussi la part des activités humaines sur le fonctionnement global du système lacustre. Dans le cadre de ce projet, une analyse sédimentaire (géométrie du remplissage sédimentaire) en vue de carottages a été réalisée. Le tout dans le but d'établir des analyses détaillées des sédiments (datations radionucléides, datations 14C, analyses XRF...), qui permettraient de déterminer la nature et la chronologie du remplissage sédimentaire et donc de préciser la dimension paléoenvironnementale du lac. Cette étude multi-proxy (sédimentologie, palynologie, géohistoire, paléoécologies...) permettrait de comparer les archives historiques du lac et d'en savoir plus sur l'impact des crues et des activités anthropiques dans ce milieu.

- ARCHISS 1 & 2 :

Le but de cette recherche est de reconstituer l'histoire paléoenvironnementale, volcanique et sismique de l'occupation humaine « depuis le Pléistocène supérieur [...] afin de contribuer à la réflexion sur la relation société / milieu en lien avec l'occupation par Néandertal puis par l'Homme moderne »⁶. Pilotée par les laboratoires GéoLab, associant les Universités de Clermont Auvergne et de Limoge au CNRS et à l'INRAP ; le laboratoire GEODE de l'université Toulouse Jean Jaurès, et le laboratoire PACEA de Bordeaux, cette étude scientifique a pour but de reconstituer l'histoire volcanique et donc les paléoenvironnements de cette zone de l'Ardèche. Ainsi, des cartographies du remplissage sédimentaire, qui ont été réalisées dans le lac d'Issarlès afin de prévoir des carottages dans une zone où les sédiments présentent une archive plus complète. Constituant l'unique sortie de terrain effectuée durant ce stage, l'étude du lac d'Issarlès s'est présentée comme la mise en pratique des méthodes et pratiques pour construire des données de terrain, que j'utilise dans l'élaboration de mes cartes (bathymétrie multifaisceaux, sismique réflexion, carottage...).

⁶ <https://msh.uca.fr/content/archiss-le-lac-dissarlès-archives-environnementales-volcaniques-et-sismiques-des-60>

3) Présentation des zones d'étude : contexte géographique, géologique et anthropique

J'ai eu l'occasion de travailler sur 5 lacs différents, dont la taille, profondeur, type, usages, origine divergeaient, ce qui m'a permis d'étudier des cas de littoraux lacustres variés, touchés par diverses problématiques (Figure 2)

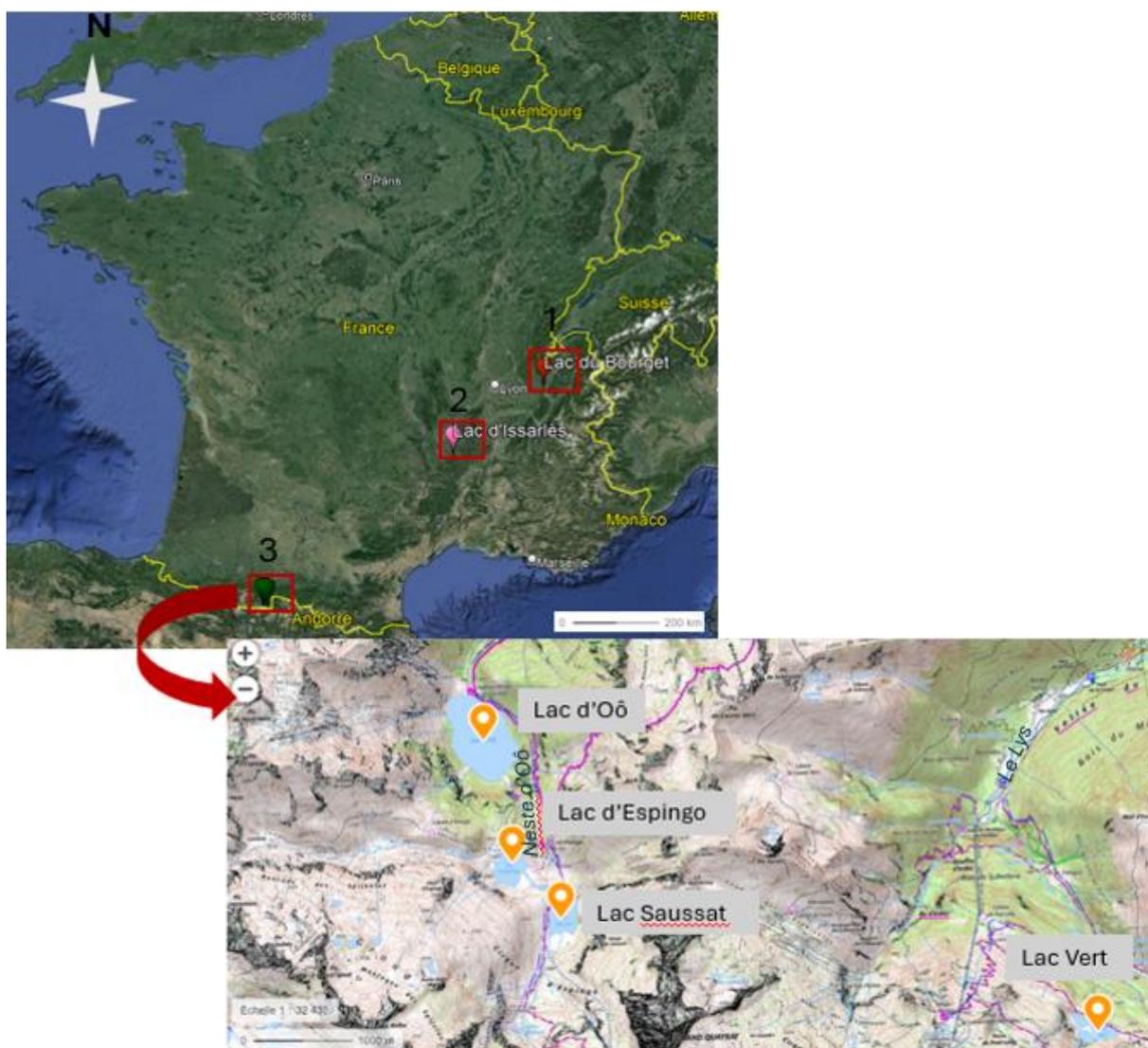


Figure 2 : lac étudiés / 1 : Lac du Bourget - Jura / 2 : Lac d'Issarlès - Massif Central / 3 : Lacs des Pyrénées : Lacs en cascade de la Neste d'Oô ; Lac d'Oô; Lac d'Espingo; Lac Saussat et Lac Vert de la vallée du Lys

Le lac du Bourget est également une zone attractive pour le tourisme estival, avec son littoral aménagé : ports, plages, chemins de randonnées, bases de loisirs et bases nautiques. Il n’y a qu’à regarder la carte topographique IGN pour y observer tous ces aménagements (Annexe 2). De plus, le niveau du lac est contrôlé par le barrage de Savières dépendant du Rhône. Mis en service en 1982, il permet la régulation des niveaux du canal de Savières et du lac du Bourget, et du lac lui-même en gardant haut niveau durant la période chaude de l’année, afin de garantir la navigation et donc l’accès aux ports de plaisance, et aux plages (Havard I., Decrock B, 2010).

3.2 Le lac d’Issarlès

Situé dans le département de l’Ardèche à proximité des sources de la Loire, le Lac d’Issarlès est un lac naturel d’origine volcanique. Situé à 1000m d’altitude, et d’une profondeur de 108m, le lac d’Issarlès est le lac de maar le plus profond de France. La dépression de 108m a été laissée par une violente éruption phréato-magmatique durant la période glaciaire du Würm (Coûteaux, 1984 ; Chapron et al, 2022). Géologiquement, son pourtour est constitué de scories basaltiques⁷ et de pyroclasties qui sont des formations caractéristiques du volcanisme (Defive, et al 2023). A l’Est du lac, nous observons un affleurement granitique constituant une falaise. Une plage artificielle est également présente sur le littoral ouest du bassin. Le bassin versant du lac est limité avec une superficie de 220 hectares seulement, avec un point culminant à 1271m. Le lac est alimenté par des cours d’eau torrentiels : le ruisseau de Montchamp et le ruisseau du Col de Gage (Cousteaux, 1983). Or le lac est équipé en aménagement hydroélectrique par EDF depuis 1950, et a été dès lors alimenté artificiellement par les eaux du Gage (et son barrage du Moulun du Peyron), les eaux de la Loire (et son barrage de la Palisse) ainsi que les eaux de la Veyradeyre, par des galeries souterraines. Les eaux du lac sont donc utilisées par EDF afin d’alimenter le structure hydroélectrique de Montpezat-sous-Bauzon dans la vallée du Rhône (Annexe 3). Son niveau est donc contrôlé oscillant entre 960 m et 1001m (Cousteaux, 1984) impliquant un marnage important hors période touristique (Annexe 4). D’un point de vue touristique, le lac est très fréquenté toute l’année par les pêcheurs, et les baigneurs en période estivale.

⁷ <https://fr.geologyscience.com/rocks/scoria/?amp=1>

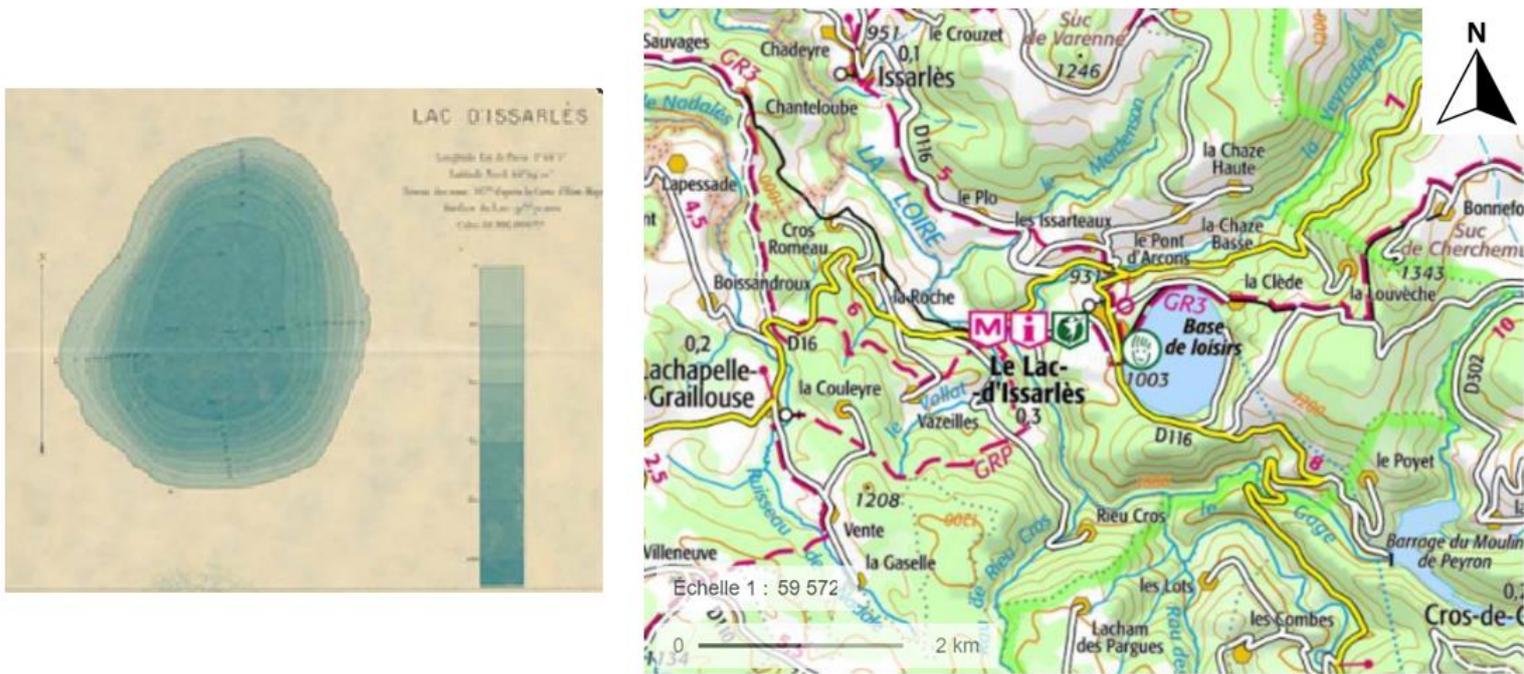


Figure 4 : Carte bathymétrique du lac d'Issarlès réalisée par André Delebecque en 1898 (à gauche) et carte IGN du lac (à droite)

3.3 Les lacs en cascade de la Neste d'Oô (Lac d'Oô, Lac d'Espingo, Lac Saussat)

La Neste d'Oô est une rivière s'écoulant dans les Pyrénées, dans le département de la Haute-Garonne. Elle fait partie du bassin versant de la Garonne et de la Pique, qui prend sa source dans le massif de Maladeta sous l'Aneto, au sud-est du bassin versant de la Neste d'Oô. Ce dernier est parsemé de lacs proglaciaires en amont et une vallée glaciaire en auge en aval (Lacou, 2021). Géologiquement, le bassin versant est plutôt granitique en amont, tandis que le partie aval est composée d'argile, de marnes, et de grès (Lacou, 2021).

La morphologie du bassin vers est expliquée par sa géologie. En effet, la présence des lacs d'ombilics ainsi que des verrous glaciaires est lié aux différences de résistance du substratum rocheux face à l'érosion glaciaire (Eléments de Géologie, 2018).

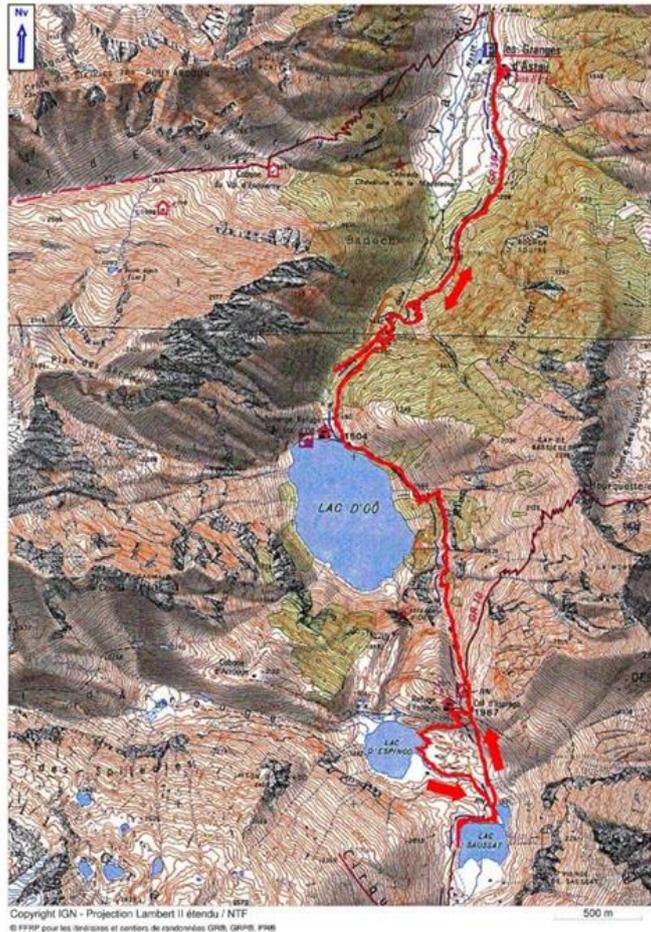


Figure 5 : carte topographique de la localisation des lacs en cascade de la Neste d'Oô, projection Lambert II, 500m, source : IGN

La Neste d'Oô quant à elle, prend sa source au lac de barrage du Portillon, pour s'écouler au Nord vers Bagnères de Luchon, rejoignant un affluent de la Garonne, la Pique. La partie amont est caractérisée par une suite de lacs d'ombilic et de verrous, avec le lac du Portillon à 2571m, le lac Saussat à 1921m, le lac d'Espingo à 1882 m et pour finalement se jeter dans le lac d'Oô à 1507m, via une cascade.

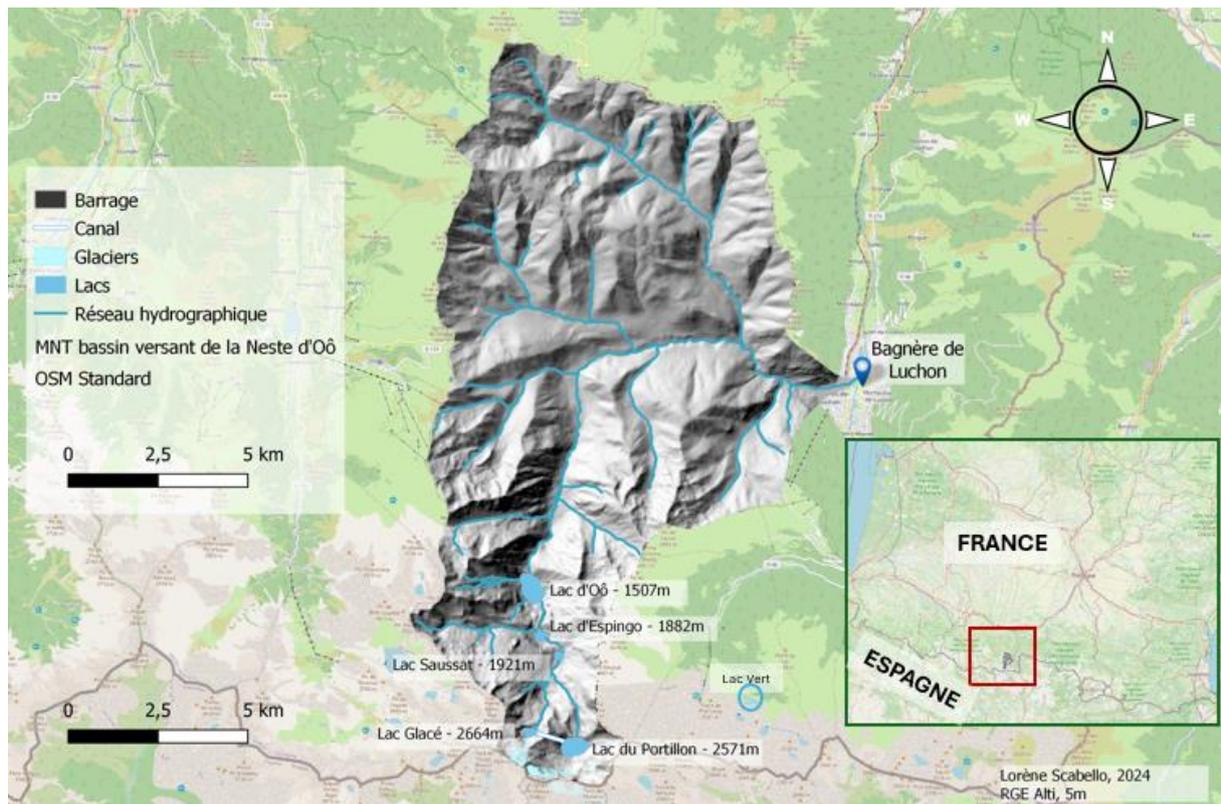


Figure 6: MNT bassin versant de la Neste d'Oô et ses lacs

Le bassin versant de la Neste d'Oô subit une forte pression anthropique, notamment avec les aménagements hydroélectriques présents, et ce depuis le XXème siècle (barrage d'Oô en 1921, par EDF). Un second barrage a été construit en amont du bassin versant en 1929, à 2580 m d'altitude, sur le lac de Portillon. Alimenté lui-même par le lac Glacé (2664m) par lequel il est relié par une conduite forcée les reliant au lac Bleu et Vert dans la vallée du Lys. Ils tous deux instrumentés comme régulateurs du débit de la Neste d'Oô lors d'évènement de crues, ou bien en soutien lors de l'étiage (cf dossier d'exécution des travaux du lac d'Oô). De plus, ces lacs en cascade sont des estives, étape de la transhumance pyrénéenne, bien que le milieu se ferme depuis 1930 avec une activité pastorale en baisse (Bathy, 2024).

Parallèlement, leur situation géographique, avec la proximité de la faille de la Maladeta, induit une exposition au risque sismique, pouvant perturber le milieu.

Le lac d'Oô est un lac naturel noyé par les aménagements hydroélectriques, situé en aval des lacs en cascade cités précédemment. Situé à 1507m d'altitude et d'une profondeur maximale de 74m (Figure 7), il est alimenté par la Neste d'Oô par le biais d'une cascade de 275m de hauteur. Son littoral schisteux est constitué de falaises raides jonchées de cônes de déjection, se prolongeant en milieu subaquatique (Annexe 5). Son barrage hydroélectrique construit en 1921, permet une régulation du niveau du lac, entraînant un marnage important en période hivernale estimé à environ 20m (Annexe 6).

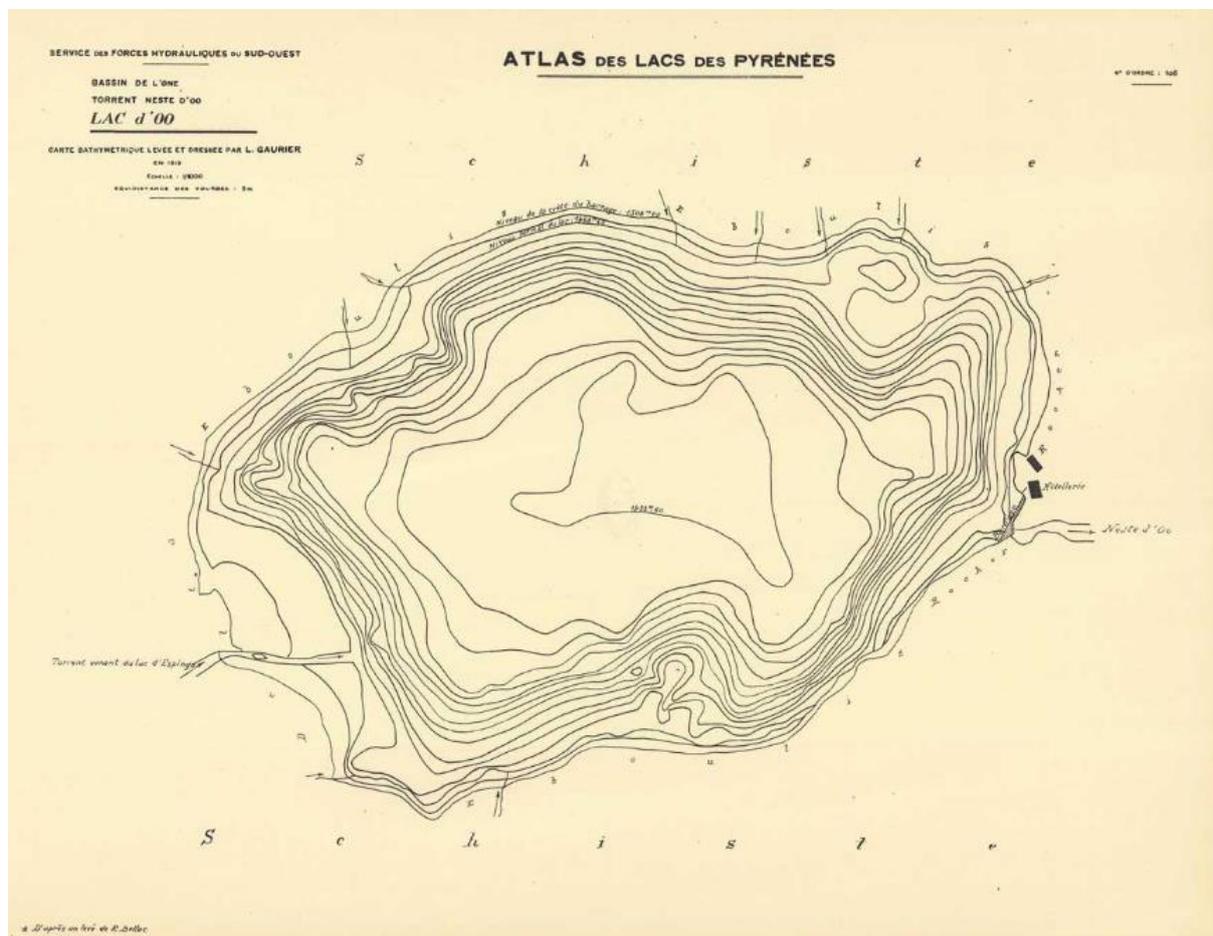


Figure 7 : carte bathymétrique de Ludovic Gaurier, 1919, d'après un levé de Belloc de 1896

Le lac d'Espingo surplombe le lac d'Oô à une altitude de 1882m, et a une profondeur maximale de 8m. Sa géologie est quant à elle caractérisée par une prédominance granitique, en rupture par rapport au lac d'Oô plutôt schisteux (Lacou, 2021).

Le lac Saussat est situé en amont du lac d'Espingo (Figure 6), à une altitude s'élevant à 1921m. Bien moins profond que les ombilics glaciaires qui le succèdent, il atteint une profondeur maximale d'environ 5m (Scabello, 2023). Tout comme le lac d'Espingo, son substratum rocheux est d'origine granitique (Lacou, 2021). Le cours d'eau relie directement Saussat avec le lac du Portillon, au Sud.

II) Cadre théorique

1) Etat de l'art : les environnements lacustres et leurs littoraux

a) *La limnologie*

Occupant 2 à 3 % des terres émergées, il existe toute une typologie de lacs. On s'attache généralement à caractériser un lac par son étendue et sa profondeur, mais en géographie, un lac est avant tout un piège à sédiments composé d'un volume d'eau stratifié (L. Touchart, 2020). Dans l'hydrosphère, les lacs sont des systèmes « lenticques » (caractérisés par un faible mouvement des eaux), plus lents et plus stables que les cours d'eau. La taille et la profondeur des lacs vont exercer une influence directe sur son fonctionnement. En effet, plus un lac est grand et profond, plus l'inertie thermique et physico-chimique de la masse d'eau est importante, et à l'inverse, plus un lac est réduit et peu profond, plus il sera sensible aux changements de leur environnement (L. Touchart, 2020).

Lorsque l'on cherche à définir ce qu'est un lac, nous nous heurtons à un problème soulevant une certaine ambiguïté, notamment avec les critères de définition. L'argument de la taille est inopérable car nous avons l'exemple de la mer Caspienne qui est un lac et dont la superficie atteint 371 000 km². Celui de la profondeur n'est pas valable non plus, car certains grands lacs comme le lac Baïkal en Sibérie est plus profond que la Manche (sa profondeur est de 1600m). Enfin, le critère de la salinité peut également être exclu, car il existe de multiples lacs salés dans le monde, comme le Grand Lac Salé aux Etats-Unis, qui porte bien son nom (Eléments de Géologie, 2018). Nous pouvons alors nous attacher à définir les lacs comme étant des « *étendues d'eau sans communication avec la mer* » (Eléments de Géologie, 2018). L'origine des lacs étant variée, nous pouvons aisément en dresser une typologie.

b) *Typologie des lacs*

Un lac peut se former dans le cas où une contre-pente empêche l'écoulement des eaux, et dans le cas où le terrain est relativement bien imperméable, limitant ainsi l'infiltration rapide des eaux. Nous pouvons donc différencier plusieurs types de lacs, résultats de processus physiques dans le temps.

- **Les lacs glaciaires** se forment par surcreusement des glaciers dans la roche, aboutissant ainsi à la création d'une contre-pente et donc au remplissage de la dépression barrée par une moraine par de l'eau (Chapron, 1999)

- **Les lacs pro-glaciaires** sont des lacs dont le bassin versant accueille encore un glacier. Parmi nos zones d'étude, le lac du Bourget dans l'avant-pays alpin lorsque ce dernier est relié au bassin versant du Rhône lors des crues (Chapron, 1999), ainsi que les lacs de la Neste d'Oo et du lac Vert dans les Pyrénées sont des lacs pro-glaciaires issus de la dernière glaciation.

- **Les lacs tectoniques** sont des environnements qui se forment dans des dépressions créées par l'activité tectonique. Nous pouvons citer le lac Baïkal en Sibérie (Russie), qui est l'un des plus grands lacs du monde avec une longueur de 634km de long, une largeur moyenne de 48 km et une profondeur de 1742m, ce qui en fait le lac le plus profond du monde (Touchart, 1998).

- **Les lacs volcaniques**, souvent caractérisés par leur forme circulaire résultent d'une accumulation des eaux dans une dépression produite par une éruption volcanique. Nous pouvons citer les lacs de cratères par exemple, dont les cratères de types maar qui sont le produit d'une violente explosion et de la rencontre du magma avec l'eau (Rougier H., 2000). Par exemple, comme l'explique notre étude, le lac d'Issarlès est un lac de maar donc d'origine volcanique.

- **Les lacs de barrage naturels** se forment lorsque qu'un obstacle imperméable entrave un cours d'eau, créant ainsi une contre-pente où l'eau peut ainsi s'accumuler et former une étendue suffisante en amont du barrage pour créer un lac. Ces barrages naturels peuvent avoir de multiples origines, comme un glissement de terrain, une faille, une coulée de lave. Leur point commun est leur capacité plus ou moins imperméable qui va piéger et stocker l'eau.

- **Les lacs de barrage artificiels** sont des ouvrages d'origine anthropique, il peut s'agir initialement d'un lac naturel qui a été noyé par la construction du barrage ou bien la création d'un lac dans une zone définie. L'objectif est souvent la création d'une réserve d'eau ou bien dans un but de production hydroélectrique (ex : lac du Portillon, dans les Pyrénées).

- **Les lacs karstiques** sont des lacs en milieu calcaire, se formant dans des dépressions superficielles fermées, et sont le fruit de l'érosion karstique⁸ (Reghezza-Zitt, 2020). Le lac du Bourget est un lac tecto-glacio-karstique, ce qui en fait une zone lacustre complexe.

c) La géomorphologie des littoraux lacustres

La formation du milieu littoral lacustre dépend de divers facteurs topographiques, géologiques, sédimentaires, qui définiront sa géomorphologie. Ainsi, nous pouvons citer quelques types de littoraux lacustres qui détermineront les usages et dynamiques locales.

Les deltas :

Les deltas sont des formations géomorphologiques se développant grâce à l'apport sédimentaire d'un cours d'eau se jetant dans un plan d'eau. L'apport sédimentaire conjugué par la chute de la vitesse du cours d'eau va induire le dépôt des particules grossières, tandis que les plus fines décanteront au large (Larras, 1964). Le delta est caractérisé par sa forme et se divise en plusieurs parties distinctes (figure 8) :

⁸<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/erosion-karstique.xml>

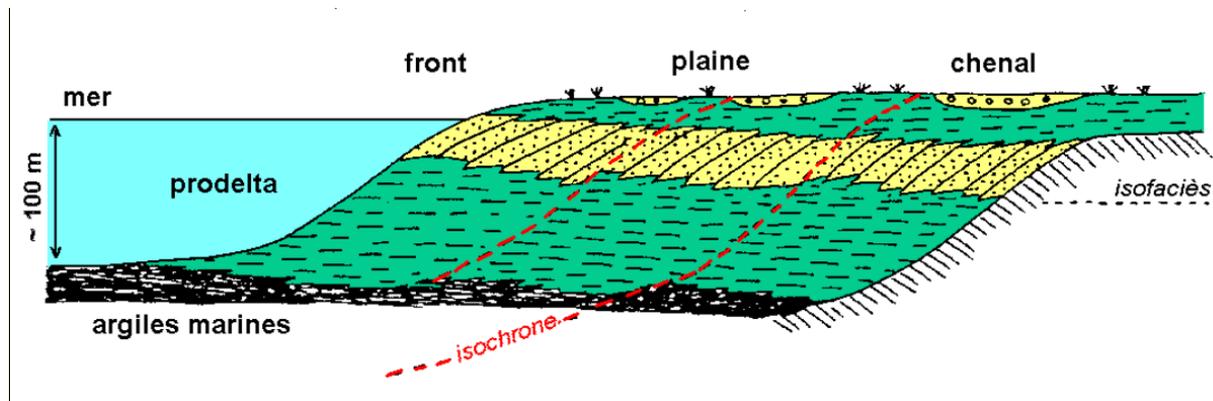


Figure 8 : schéma de la morphologie d'un delta, source : <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours-sed/sed-10.htm>

- La **plaine deltaïque** se caractérise par des barres sableuses ou bien des dépôts de galets dans les chenaux. Ce sont des zones riches en matière organique, et relativement plate, où les dépôts grossiers vont donc s'échouer.
- Le **front de delta** est la zone de rencontre entre les eaux chargées en sédiments et le plan d'eau. La densité des eaux selon leur charge propre, mais aussi la taille des particules transportées va directement influencer sur le type de sédimentation.
- Le **prodelta** est la partie subaquatique en aval de la formation deltaïque. Il s'agit de talus sédimentaires ayant une forte pente, accueillant des dépôts plus fins qu'en amont.

Les deltas lacustres sont des environnements dynamiques qui progradent, menant au comblement du lac. La progradation d'un delta résulte de la superposition des couches sédimentaires des apports du versant, qui s'avancent petit à petit sur le plan d'eau dans lequel le cours d'eau initial se jette. Ces milieux instables sont parcourus par des chenaux creusés par les cours d'eau, qui peuvent changer de place, se diviser, et donc migrer laissant le delta d'origine, inactif pour en constituer un nouveau sur son nouveau chemin (Larras, 1964).

Il existe différents types de deltas, influencés par les courants, les marées, les apports fluviaux... Nous nous attacherons à en décrire un en particulier, les deltas sous-marins profonds ou « deep-sea fans ». Ces formations subaquatiques résultent d'épisodes périodiques de forts apports sédimentaires par des courants de turbidité, par le biais de canyons sous-marins, le long d'une pente, jusqu'à accumulation de ces dépôts formant un édifice de type deltaïque (Bellaiche, 1975).

Dans nos lacs, nous étudierons ces deltas à travers l'exemple du lac du Bourget, ainsi que les lacs de Saussat et Espingo. Nous verrons également un cas particulier dans le lac d'Issarlès.

Les beines carbonatées :

Formation spécifique au lac du Bourget dans notre cas, les beines carbonatées résultent de la précipitation de calcite (apport de son environnement largement calcaire). Ces plateformes peu pentues créent des continuités subaquatiques de faible profondeur (0 à 5 m). Le beine littorale est limitée par un tombant qui plonge en profondeur, dont la topographie pentue crée une rupture avec le plat de la beine (Chapron, 1999).

Les falaises rocheuses :

Ces formations sont des affleurements rocheux étant très abruptes. Elles peuvent se prolonger sous l'eau, créant ainsi une topographie littorale particulière, et s'étirant en profondeur (Chapron, 1999). Ces zones instables, qui lorsqu'elle atteint 10°, peuvent générer d'importants remaniements gravitaires. La nature de ses pentes joue également : tandis que les pentes calcaires vont plutôt favoriser des déjections sablo-graveleuses (Chapron, 1999), les pentes granitiques vont induire des débris plus grossiers de même nature.

Cônes de déjection :

Les cônes de déjection sont des formations sédimentaires issues de processus érosifs liés à la torrencialité. Caractéristiques des paysages de montagnes, les cônes de déjection se forment sur des versants torrentiels (Amelot, et al, 2003). Ils sont composés d'un bassin de réception en amont (Figure 9) regroupant ravines et ruissellements qui jouent un rôle érosif fort important. Ces derniers viennent se concentrer pour former un chenal d'écoulement étroit et pentu, dont la compétence est importante par sa grande vitesse, favorisant ainsi le transport des matériaux du versant. Enfin, le cône de déjection est la partie en aval du versant, zone ayant une pente plus douce ce qui induit le dépôt des matériaux transportés, et par conséquent une accumulation de ces derniers. Les cônes de déjection sont donc alimentés par des cours d'eau intermittents, torrentiels (Amelot, et al 2003).

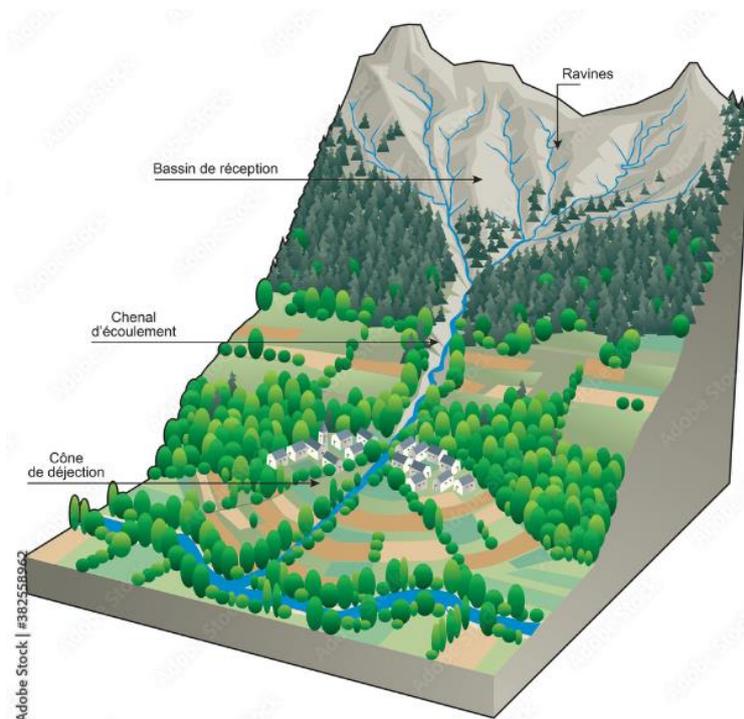


Figure 9: : schéma organisation d'un cône de déjection, source : Adobe Stock

d) Les aléas et risques en zones lacustres

Les environnements montagnards sont exposés à de nombreux risques et aléas tels que les séismes ou les crues, pouvant perturber les milieux lacustres. Ces perturbations se retrouvent dans les sédiments lacustres, permettant ainsi de retracer l'histoire du bassin versant.

« *Il n'y a pas de montagne sans séismes* » (Souriau, Sylvander, 2004). Imprévisible, le risque sismique est induit par le glissement de 2 bordures d'une faille sous l'effet des contraintes. C'est notamment l'accumulation de grandes quantités d'énergie sur la faille qui crée cette rupture, qui va à son tour engendrer de fortes ondes sismiques, s'atténuant sur la distance. Le séisme est caractérisé par le **foyer**, qui est le point sur la faille d'où débute la rupture ; l'**épicentre**, qui est la projection en surface du foyer, zone où l'intensité maximale est ressentie ; les caractéristiques de la rupture, c'est-à-dire l'étendue de la surface de glissement et l'amplitude du glissement sur cette surface ; la **magnitude**, qui dépend de l'énergie libérée ; et enfin son **intensité**, qui est évaluée après coup selon les dégâts observés (Souriau, Sylvander, 2004).

Nos zones d'étude sont des milieux concernés par le risque sismique. Des séismes historiques ont marqué ces environnements, avec le séisme du 18 Février 1822 dans les environs du lac du Bourget dont la magnitude fut estimée entre 5.5 et 6 (Chapron, 1999). D'autres séismes de moindre importance ont pu être répertoriés. Les sédiments ont quant à eux un rôle d'enregistreur, avec de fines turbidites pouvant être corrélées à ces événements (Chapron, 1999). Dans les Pyrénées, le séisme du 21 juin 1660 dont la magnitude a été estimée à 6 a marqué les consciences, mais a également laissé sa trace dans les sédiments lacustres (Souriau et Sylvander, 2004). Ces territoires sont donc soumis à des séismes, mais également à des crues majeures qui ont pu influencer la sédimentation de nos lacs (exemple du séisme du Teil en 2019 dans la vallée du Rhône).

Bien que le risque tsunami en zone lacustre ne soit pas le plus abordé, ces environnements y sont tout de même confrontés. En effet, les séismes, impliquant des glissements de terrain subaériens et / ou subaquatiques peuvent générer de fortes perturbations, déclenchant ainsi des tsunamis. Des études sur les paléotsunamis permettent notamment de prendre du recul sur les potentiels risques auxquels ont été confrontées les populations du passé et donc les sociétés actuelles (Zafar, et al, 2024). La reconstitution de ces événements sur la base d'archives sédimentaires permet de se rendre compte des zones impactées. Le lac d'Aiguebelette en Savoie (Figure 3), tout comme le lac du Bourget, a subi des perturbations d'origine sismique, ayant potentiellement généré des paléo-tsunamis estimés à une hauteur maximale de 3.7m (Zafar, et al, 2024).

Le lac du Bourget a subi des crues importantes, par exemple les crues de la Leysse et de son bassin versant, qui ont pu provoquer des inondations à Chambéry. Notamment durant le Petit Age Glaciaire (PAG) avec les crues du Rhône, expliquées par les intenses précipitations durant cette période (Chapron, 1999). Ces crues ont été fortement accentuées et

influencées par la déforestation du bassin versant et les aménagements humains qui ont été réalisés sur les cours d'eau (Chapron 1999).

En réponse à ces crues importantes, des aménagements dont des digues sur le Rhône au Nord du lac du Bourget, ont été réalisés afin de contraindre et diriger les cours d'eau. Des travaux de correction et de détournement des cours d'eau ont été effectués. Notamment sur la Leysse qui s'évanouit dans le Bourget, dont sa zone d'influence a été modifiée affectant ainsi sa topographie subaquatique (Chapron, 1999). De plus, l'installation d'aménagements hydroélectrique impacte directement les environnements lacustres par la modification de leur niveau (ennoisement des lacs, marnages importants), et donc sur leurs littoraux. La volonté de garder un niveau satisfaisant pour garantir une attractivité optimale durant la période estivale, ou bien produire de l'électricité, sont des activités exerçant une influence directe sur les dynamiques lacustres, dont le contrôle est d'origine anthropique comme pour le lac d'Issarlès, le lac du Bourget, ou encore le lac d'Oô.

L'évolution des bassins versants a aussi montré l'impact du pastoralisme sur l'environnement, notamment par rapport à nos lacs des Pyrénées dont l'occupation liée aux estives est très marquée depuis plusieurs millénaires (Baty, 2024).

2) Etat de l'art : les technologies utilisées

Afin de réaliser des campagnes de géophysiques, diverses technologies sont utilisées afin d'effectuer une cartographie plus ou moins fine du milieu montagnard et de sa topographie.

Les données LIDAR « light detection and ranging » sont utilisées dans la cartographie géophysique, et sont sous forme de « nuages de points cotés qui peuvent être gérés, visualisés, analysés et partagés »⁹ traitables via des logiciels tels que QGIS ou ArcGis. Les données LIDAR sont récupérées par un engin de collecte (avion, drone, hélicoptère...) doté d'un système de scanner laser, un système de positionnement satellitaire (GPS). « *Les impulsions laser émises par un systèmes lidar se reflètent sur des objets placés à la fois sur la surface du sol et au-dessus : végétation, bâtiments, ponts et ainsi de suite. Une impulsion laser émise peut revenir au capteur lidar sous forme d'un ou plusieurs retours.* »¹⁰. Il existe plusieurs types de Lidar, dont le Lidar aéroporté qui utilise des rayons infrarouges d'une longueur d'onde de 1064nm, et est principalement utilisé pour la cartographie subaérienne, donc terrestre (Martin, 2019). Le Lidar vert, dont la longueur d'onde est généralement à 532 nm (dans la partie verte du spectre du visible), permet notamment de révéler la bathymétrie des surfaces immergées, permettant ainsi de produire une image fine de la topographie

⁹ <https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/latest/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm>

¹⁰ <https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/latest/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm>

subaquatique de nos littoraux par exemple. Son utilisation reste tout de même limitée selon la tranche d'eau (faible tranche d'eau) et sa transparence (Martin, 2017).

Pour détailler le fond de nos lacs (ou océans), des sondeurs acoustiques multifaisceaux, généralement montés sous la coque d'un navire permettent depuis la surface de mesurer la profondeur de la lame d'eau en plusieurs points, simultanément (Figure 10). Le sondeur émet une onde acoustique qui va se propager dans l'eau, être réfléchié par le fond et revenir à la surface (Arricau, 2019). Les échos renvoyés vont être enregistrés et le temps de parcours entre le fond et la surface sera calculé, permettant alors de connaître la vitesse de propagation des ondes acoustiques dans l'eau, ainsi que la distance parcourue par l'onde et donc la profondeur (Arricau, 2019).

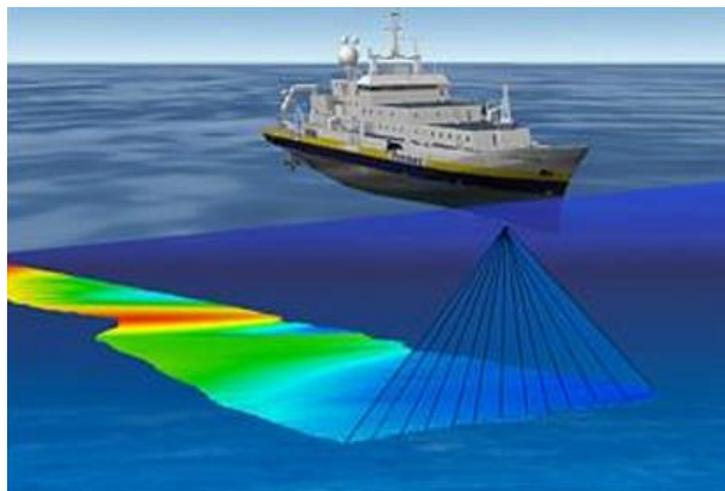


Figure 10 : schéma d'une campagne de bathymétrie multifaisceaux, source : Ifremer

Enfin, la sismique réflexion est une autre méthode permettant de visualiser la géométrie des remplissages sédimentaires à partir de la propagation des ondes acoustiques. Son efficacité variera selon la nature et la composition des sédiments : un sédiment riche en gaz absorbera les ondes, altérant ainsi ces dernières. Un sédiment grossier aura également tendance à dénaturer les signaux (Arricau, 2019). Le sondeur KNUDSEN émetteur-récepteur de type « Chirp » émettant du 4, 14, et 200kHz (très haute fréquence), qui est un sondeur de sédiments compacts disponibles à GEODE. Le système est alimenté par une batterie, couplé à un ordinateur ainsi qu'à un GPS le tout posé sur une petite embarcation permettant le suivi de l'acquisition en temps réel, le positionnement des lignes sismiques et la navigation (Lacou, 2020).

III) Cadre méthodologique

1) Collecte des données et traitement des données

Collecte des données

Pour mener à bien mon travail cartographique, j'ai dû conjuguer différentes données OpenSource accessibles sur internet, avec des données directement produites par mon encadrant, Emmanuel Chapron. De plus, j'ai pu récupérer des bases de données d'un ancien étudiant, Ahmadou Bamba Sarr, ayant également travaillé sur le lac d'Issarlès, afin d'enrichir la base de données existante sur ce site. Ayant déjà fait un stage au laboratoire GEODE en fin de 3^{ème} année de licence, j'ai pu retravailler sur les données sismiques déjà traitées (lac d'Oô, lac d'Espingo, lac Saussat), en les améliorant et les précisant.

J'ai tout d'abord téléchargé des données LidarHD via le site *Géoservices*, portail relié à l'IGN. Ces données m'ont donc permis de créer un Modèle Numérique de Surface (MNS) pour mon étude géomorphologique des lacs de la Neste d'Oô, sous la forme de nuages de points (.laz) de résolution 5m.

Afin de réaliser les cartes topo-bathymétriques du lac d'Oô, je me suis appuyée sur une carte bathymétrique de Ludovic Gaurier réalisée en 1919 (glaciologue et limnologue spécialiste des Pyrénées). Tandis que pour les lacs Saussat, et Espingo j'ai récupéré les données de la sismique réflexion produites par Emmanuel Chapron lors de précédentes campagnes de terrain (2019 et 2022). Ayant déjà eu l'occasion de travailler sur ces lacs lors d'un précédent stage, j'ai donc récupéré ma base de données pour l'enrichir et la compléter avec des informations géomorphologiques (carte topographique IGN et données Lidar).

Le MNT (1m) du lac du Bourget ont été fournies par le Conservatoire d'Espaces naturels (CEN) de Savoie. L'acquisition des données s'est faite par Lidar vert aérien, avec un sondeur multifaisceaux, avec une cartographie très fine du littoral. Cette campagne s'intègre dans une démarche de protection et de gestion de l'environnement par le CEN (Annexe 7). De plus, je me suis appuyée sur les données bathymétriques issues de la thèse de 1999 d'Emmanuel Chapron sur le Bourget, qui a réalisé plusieurs cartes bathymétriques, dont des cartes du paléolac en se basant sur la stratigraphie des sédiments du lac.

Les données du lac d'Issarlès m'ont été fournies par Ahmadou Bamba Sarr, qui a travaillé sur ce lac et a réalisé une série de cartes topo-bathymétriques dans le cadre de son stage de M2. J'ai simplement complété ce jeu de données avec des données produites par Emmanuel Chapron en 2023 et son sondeur Knudsen en 4kHz, enrichissant ainsi la base de données préexistante (Lidar aéroporté de 2020 et bathymétrie d'EDF de 2012) (Chapron et al 2022).

Sédimentologie : carottage, échantillonnage, et datation

Dans le cadre du projet ARCHISS 1 et 2, une campagne de carottage a été prévue sur le lac d'Issarlès en juin 2024. Afin de déterminer des points de carottages permettant d'obtenir

les plus beaux faciès, une prospection a été réalisée à l'aide d'un sondeur 3.5kHz. C'est la zone ayant le plus beau faciès qui a été sélectionnée et donc les coordonnées GPS ont été transmises à l'équipe pour le carottage. Les données acquises sur le terrain sont venues compléter les campagnes sismiques des années précédentes, affinant ainsi le maillage. J'ai eu la chance de participer à cette sortie de terrain en mai 2024 afin d'observer les processus d'acquisition des données acoustiques.

Une fois les points de carottage déterminés, le carottier à piston a été mis à l'eau afin de débiter le carottage aux points donnés. N'ayant pas pu assister à cette étape, qui s'est soldée par un échec à cause de mauvaises manipulations et de soucis de pistons (système servant à récupérer les sédiments et les sécuriser une fois que le tube est inséré dans ces derniers), j'ai tout de même pu participer à l'ouverture de carottes de la campagne de 2024 au laboratoire GEODE. Il suffit pour cela de déposer la carotte sur un raque prévu à cet effet puis de la scier en deux. Les deux faces du tubes découpées de façon parallèle sont ensuite séparées délicatement par deux plaques en plastiques, de la manière la plus délicate possible afin de ne pas altérer la qualité des sédiments. Chaque partie est nommée, la plus belle sera archivée (section Archive, A) tandis l'autre sera échantillonnée (section Work, W). Les carottes sont alors décrites sur le moment, emballées puis placées dans une chambre froide afin de maximiser leur bonne conservation. Selon les projets, des analyses sédimentaires sont programmées : le découpage de fines tranches de sédiments chaque centimètres (Bamba Sarr, 2022) qui subiront diverses étapes telles que la mise en tube, séchage, réduction en poudre afin d'être datées par des laboratoires spécialisés. Les datations des sédiments récents se font au C14¹¹ ou aux radionucléides¹², afin de mieux comprendre les dynamiques sédimentaires et la chronologie du remplissage lacustre. La susceptibilité magnétique peut également être mesurée, permettant notamment déterminer les minéraux composant les sédiments.

Pour le lac Saussat, des données XRF (X-Ray fluorescence) en provenance du laboratoire de Barcelone travaillant également sur le programme FACT ont été utilisées. Cela permet notamment d'identifier les différents éléments présents dans les sédiments, sans détruire ou dégrader les éléments chimiques présents dans un échantillon (Guillemain, 2009).

D'autres techniques comme la spectrométrie est utilisée en sédimentologie afin d'analyser et quantifier les couleurs des strates sédimentaires. La mesure des couleurs de ces strates se fait selon la lumière absorbée, réfléchié ou transmise, permettant une analyse plus fine des sédiments (Lacou, 2021).

¹¹ Le carbone 14 est un isotope radioactif du carbone, et est naturellement présent dans l'atmosphère et est absorbé par les organismes vivants. Cette méthode de datation permet sur la base de la quantité présente de C14 dans les restes de matières organiques, de calculer le temps écoulé depuis la mort de l'organisme (Chesselet, 1970)

¹² le 210 Pb, ou éléments artificiels comme le 137 Cs et le 241 Am, émis par les tests nucléaires atmosphériques et les accidents des centrales nucléaires tel que la catastrophe de Tchernobyl en 1986 (Bamba Sarr, 2022),

2) Méthodologie de la cartographie topo-bathymétrique et géomorphologique des lacs

Les logiciels utilisés

Plusieurs logiciels ont été utilisés pour mener à bien mes missions de cartographie, notamment QGIS et CloudCompare pour l'approche géomatique (Open Source), mais également le logiciel EdifisSegy. Ce logiciel développé entre 2012 et 2016 par Emmanuel Chapron avec les laboratoires ISTO (Orléans) et GEODE rassemble 3 objectifs. Tout d'abord il permet une visualisation de données sismiques sur la morphologie, la géométrie et l'hétérogénéité des remplissages sédimentaires. Mais également la standardisation de la bancarisation et du traitement des données numériques géoréférencées (Chapron, 2016). Ce logiciel m'a notamment permis de visualiser le profil sismique des lacs sur lesquels j'ai travaillé, et donc observer l'épaisseur des sédiments ainsi que leur géométrie. Puis, pour exploiter ces données sur un logiciel de cartographie, j'ai « pointé » les horizons clés sur les sondages acoustiques, pour par la suite les convertir en vecteur (.shp) intégrable dans un SIG.

Création des Modèles Numériques de Terrain : les cartes topo-bathymétriques des lacs et les MNT des bassins versants

Afin de traiter mes données Lidar sur les logiciels de cartographie dans le but de créer des MNT, j'ai dû passer par un protocole plus complexe. Une fois les dalles de données LIDAR sélectionnées pour le téléchargement, j'ai utilisé le logiciel CloudCompare, permettant d'ouvrir, visualiser, et traiter ces nuages de points. Le but de cette manipulation est de convertir chaque dalle, une par une en MNT, et donc en donnée raster, afin de les rendre traitables sur QGIS.

Une fois la dalle importée sur CloudCompare, il est important de paramétrer le logiciel afin de faire ressortir le MNT.

Puis, j'ai pu choisir des paramètres selon le type de surface sur laquelle je travaille. Pour mon cas il s'agissait de zones de reliefs, parfois très pentues.

Ensuite, j'ai dû sélectionner les derniers paramètres avant de lancer l'opération de traitement. Pour mon travail 2 paramètres principaux m'intéressaient : « Cloth resolution », permet de diviser l'espace dans le nuage de points et d'en capter les variations et subtilités. Plus la résolution sera élevée, plus le processus sera précis. Néanmoins, en testant diverses résolutions, il en ressort qu'une trop haute résolution n'aboutit jamais, peut être en raison de la puissance de la machine sur laquelle le travail est effectué. Le choix de la résolution dépend notamment de la complexité des données (topographie). Le second paramètre est « Classification treshold », qui est utilisé pour « spécifier le seuil de déformation au-delà duquel les points du nuage de points seront considérés comme non-classifiés, c'est-à-dire

qu'ils seront assignés à l'hors sol »¹³. Une fois que les paramètres sont sélectionnés, il ne reste plus qu'à attendre plus ou moins longtemps pour que la couche concernée soit traitée. L'opération peut durer entre 20 min et 1h30 pour les dalles les plus complexes. En résultat : une couche divisée en 2, avec le MNT et le MNS (Modèle Numérique de Surface) séparés. J'ai effectué plusieurs tentatives avec des paramètres variables pour en tirer un résultat avant la meilleure qualité possible.

Une fois cela fait, j'ai utilisé la fonction « rasterize », puis j'ai sélectionné une série de paramètres afin de convertir notre couche de nuage de points en couche raster exploitable sur QGIS. Il suffit de télécharger la donnée pour finaliser le traitement. Cette opération a été réalisée sur les dalles concernant les alentours de nos lacs. Le faire à l'échelle du bassin versant aurait été trop complexe et pas forcément pertinent. En effet, le but de l'utilisation de la donnée LiDAR est sa précision et ses détails, dont la pertinence est plus importante lorsqu'on regarde de plus près pour mieux observer la géomorphologie du milieu.

Il est également possible de procéder autrement pour la création d'un MNT. Le LIDAR étant une donnée très lourde, d'autres données en OpenSource telles que les données RGE Alti (1m et 5m) sur le site Geoservices, mis à jour à partir « des levés obtenus par LIDAR aéroporté ou par corrélation d'images aériennes »¹⁴. Ces données sont téléchargeables par département, et plus légères que les données LIDAR brutes. Elles sont donc plus facilement manipulables à l'échelle d'un bassin versant.

J'ai donc utilisé ces données pour créer le MNT du bassin versant du lac du Bourget et le MNS pour le bassin versant de la Neste d'Oô, permettant l'étude de l'environnement géomorphologique de ces sites.

Une fois que j'ai téléchargé les données RGE Alti (résolution de 5m), je les importe sur QGIS, et je sélectionne celles correspondant à mon bassin versant. Une fois que le tri est fait, je passe par l'outil « Fusionner » afin de rassembler les différentes dalles ce qui facilitera le traitement de la donnée.

Une fois la fusion réalisée, et après avoir importé le contour du bassin versant, je dois découper le MNT 5m sur les contours vecteur du bassin versant. Pour réaliser cela, j'ai utilisé l'extension GRASS et son outil « r.mask.vect », qui permet de créer un « masque » et donc de découper un raster selon une couche vecteur.

Ainsi, j'obtiens un MNT 5m du bassin versant de ma zone d'étude, avec une résolution assez bonne qui me permet notamment de voir le paleolac du Bourget (Figure 3).

¹³ <https://www.sigterritoires.fr/index.php/qgis-pour-lidarmodele-numerique-de-terrain-mnt-avec-cloudcompare/>

¹⁴Source : <https://geoservices.ign.fr/rgealti>

La carte topo-bathymétrique du lac d'Oô, et la carte paleo-bathymétrique du lac du Bourget ont quant à elles été réalisées à partir de données numérisées puis digitalisées. En effet, je me suis appuyée sur la carte bathymétrique de Belloc, reconstituée par L. Gaurier pour aboutir à la carte topo-bathymétrique du lac d'Oô. J'ai utilisé l'outil *Géoréférencement* de QGIS pour donner des coordonnées GPS aux images géoréférencées, puis à l'aide de l'outil de digitalisation, j'ai reproduit les courbes de niveau déjà présentent.

Puis pour réaliser mes cartes topobathymétriques du lac du Bourget, il m'a suffi de géoréférencer sur QGIS les cartes présentent dans la thèse d'Emmanuel Chapron, complétées par lui-même avec des courbes de niveau supplémentaires afin de densifier la donnée (Annexe 8). Puis, je les ai digitalisés, tout comme pour le lac d'Oô, pour enfin utiliser l'outil d'interpolation (interpolation TIN) à partir de points extraits de mes polygones digitalisés. Cela permet de générer mon MNT topo-bathymétrique des lacs.

Quant à la cartographie des lacs d'Espingo et Saussat, j'ai dû passer par le logiciel EdifisSegy afin de pointer les horizons du fond du lac (Figure 11) et de les transférer ensuite sur QGIS. Après avoir sélectionné le répertoire de mes fichiers, ces derniers s'affichent ensuite automatiquement. En sélectionnant « Profil » je peux les consulter et commencer à ajouter de nouveaux horizons en pointant sur l'écran. Pour ma part j'ai pointé les horizons en 14kHz disponibles sur le sondeur Knudsen car ces derniers sont plus précis que les 200kHz (Chapron, 2022). Avec ce sondeur, chaque transect réalisé sur le terrain est enregistré sous 200kHz et un fichier de plus basse fréquence est produit selon le capteur monté au préalable (4kHz ou 14kHz).

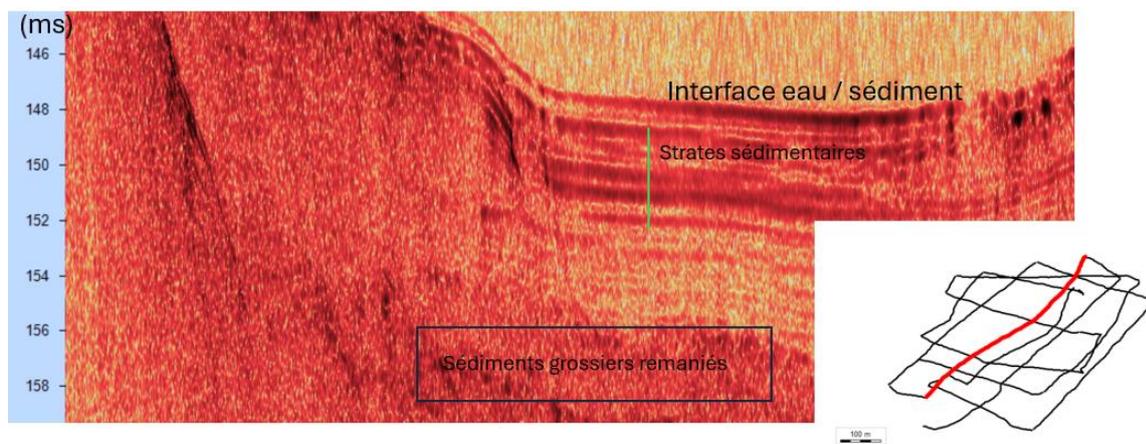


Figure 11: exemple d'un profil sismique Issarlès et localisation de la navigation de 2019 sur le logiciel EdifisSegy (4kHz)

Une fois toutes les données sismiques traitées sur EdifisSegy, nous pouvons les exporter au format Shp et les intégrer à un SIG. Toute la démarche a été effectuée sur QGIS en raison de sa simplicité d'utilisation et de son accès gratuit. Une fois les horizons importés dans un nouveau projet sur QGIS, nous convertissons les données linéaires de la navigation en données ponctuelles avec l'outil « extraire les sommets », pour enfin les fusionner. Les points correspondent à une profondeur en milliseconde (ms) temps double (ms TWT), ce qui

représente le temps en ms qu'une onde met pour parcourir l'aller-retour entre le capteur et l'horizon du fond du lac. L'étape est donc de convertir ces ms TWT en mètres. Pour cela, je crée une nouvelle colonne dans la table attributaire de la couche shp, en utilisant la fonction « $z(\$geometry)$ », puis, je crée de nouveau une colonne vierge où je multiplie le champ précédent par $0,75^{15}$ pour me donner la profondeur en mètres.

Une fois que cela est fait, je délimite les contours de mes lacs via une image satellite intégrée à mon logiciel, afin d'ajouter le niveau 0 correspondant au littoral du lac. L'étape finale est d'interpoler ces couches afin de produire la carte bathymétrique. Pour cette manipulation qui s'est révélée trop complexe pour QGIS, j'ai dû basculer sur le logiciel ArcGis Pro (fourni grâce à la formation du master GEMO) qui est un logiciel SIG payant mais plus performant. Ainsi, l'outil « Interpolation TIN » sur ArcGis Pro a permis de passer au-dessus de la limite du logiciel QGIS et a largement facilité le bon déroulement de mon travail. Une fois la carte bathymétrique générée, il reste une dernière étape : découper cette dernière sur les limites du lac. Le découpage peut être fait sur QGIS grâce à l'outil « Découper un Raster selon un Vecteur », avec comme couche polygonale celle correspondant au contour du lac. La nouvelle couche peut désormais être enregistrée et la symbologie doit être modifiée afin de réaliser sa mise en page finale. Afin de finaliser totalement la carte, j'extrais les courbes de niveau pour aboutir à une vraie carte topo-bathymétrique.

La carte topo-bathymétrique du lac d'Oô, et la carte paleo-bathymétrique du lac du Bourget ont quant à elles été réalisées à partir de données numérisées puis digitalisées. En effet, je me suis appuyée sur la carte bathymétrique de Belloc, reconstituée par L. Gaurier pour aboutir à la carte topo-bathymétrique. Je suis passée par l'outil Géoréférencement de QGIS pour donner des coordonnées GPS aux images géoréférencées, puis à l'aide de l'outil de digitalisation, j'ai reproduit les courbes

Création des cartes géomorphologiques des environnements lacustres

Une fois mes MNT intégrés à mon logiciel, j'ai la possibilité d'extraire les pentes via l'outil « Traitement » - « Pentés », ce qui permet de mettre en exergue la géomorphologie de mon MNT, accentuant certains détails pouvant passer inaperçus. J'ai notamment utilisé cette fonction pour cartographier la géomorphologie du lac du Bourget, à partir du Lidar vert du littoral (Annexe 9).

Quant au lac d'Issarlès, j'ai pu cartographier la topographie subaquatique juste en utilisant la fusion des données fournies par EDF (pour la géomorphologie subaquatique) et par celles les données Lidar d'Escadrone pour les pourtours (bassin versant) dont la qualité est bonne par sa grande précision (Bamba Sarr, 2022).

¹⁵ « Nous savons, en effet, que si la vitesse (m/s) est une distance (en m) par unité de temps (en seconde), la distance sera alors vitesse * temps. La vitesse de l'onde dans le sédiment est généralement de 1500m/s. C'est pourquoi on doit la diviser par 2 pour passer de temps double en temps simple puis on convertit les millisecondes en mètre (1 ms = 0.001 m). Finalement cela revient à l'équation : profondeur (en mètre) = profondeur (en milliseconde temps double) * 0.75. » (Bamba Sarr, 2022).

Tandis que pour les lacs de la Neste d'Oô, je me suis basée sur les données Lidar de l'IGN que j'avais traité précédemment pour identifier les différentes formes géomorphologiques de surface des littoraux concernés. Etant donné que la topographie est assez forte (rappelons que nous sommes en pleine montagne), le Lidar était par endroit moins net, ce qui a complexifié le repérage. Pour pallier ce souci, j'ai géoréférencé des photographies aériennes en provenance du *Géoportail*, qui mettaient nettement plus en valeur certaines formes géomorphologiques. Pour m'assurer et compléter au mieux cette cartographie, j'ai utilisé en parallèle la fonction 3D de Google Earth pour observer sous différents angles la géomorphologie des littoraux de mes lacs (Annexe 11).

Ainsi, pour réaliser les cartes géomorphologiques des lacs, j'ai effectué un premier repérage, puis j'ai usé de l'outil de digitalisation afin de créer de nouvelles couches Shp et enrichir ma base de données (figures 12, 13 et 14)

IV) Résultats

1) Le lac du Bourget : un grand lac de vallée glaciaire, et son paléoenvironnement

Le lac du Bourget, grand lac de vallée glaciaire est un territoire présentant une anthropisation des littoraux lacustres marquée et significative, et ce depuis les 10 mille dernières années, correspondant à la période de l'Holocène. Ce lac est situé à l'interface de contextes tectoniques et géologiques complexes, ce qui rend son système très intéressant et surtout, sensible aux événements sismiques de la région (Figure 12). La faille de Culoz et celle du Col du Chat sont les 2 principales failles actives le long desquelles sont localisés des séismes historiques (Chapron et al, 1999). Dans le cadre du projet FACT, où l'un des objectifs futurs serait de comparer la paléosismicité de ces failles et de celle du Vuache (Figure 2) afin de préciser l'exposition des grands lacs (Bourget, Annecy, Aiguebelette) au risque sismique.

Parallèlement, les études paléoenvironnementales sur l'évolution du lac ont appuyé sur la relation directe entre les occupations humaines, qui ont pu être identifiées via des fouilles subaquatiques archéologiques, et les variabilités climatiques (Chapron, et al, 2007). De plus, les outils de cartographie acoustiques cités précédemment (sismique réflexion, sonar multifaisceaux, Lidar vert...) se révèlent être d'une grande utilité dans la reconstitution des paléoenvironnements. Dans mon cas, je me suis notamment appuyée sur cartographie par Lidar vert (résolution de 1m) pour élaborer mes réflexions sur le lien entre les occupations humaines passées / présentes et les formations géomorphologiques sur le littoral du lac du Bourget. Parallèlement, les données RGE Alti de l'IGN d'une résolution de 5m, téléchargées sur le site *Geoservices* m'ont permis d'élargir mon point de vue à l'échelle du bassin versant et plus encore, laissant apparaître des informations géomorphologiques témoignant d'évolutions environnementales majeures (présence des paléolacs en témoigne).

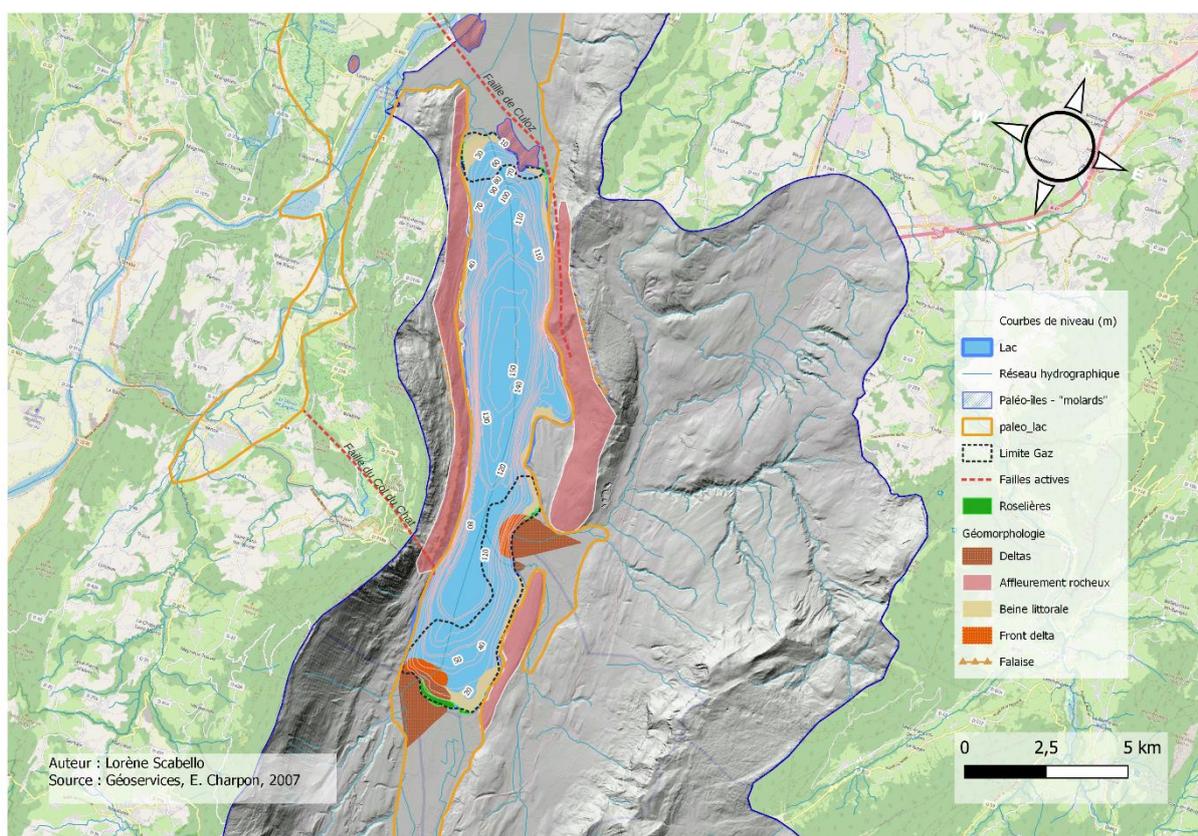


Figure 12 : carte géomorphologique du lac du Bourget

Le littoral actuel du lac du Bourget se situe à 231.5m d'altitude, au-dessus de sites archéologiques (Annexe 10). En effet, au cours du temps, plusieurs phases régressives ont été observées, durant le Néolithique (4000-3700 ans cal. BP), l'Age du Bronze (3500-2800 ans cal. BP) et la période gallo-romaine (1700-1500 ans cal. BP) (Chapron, et al, 2007), laissant une partie du littoral actuellement immergé, totalement émergé. Nous pouvons corréliser cette information avec les périodes d'occupation du littoral qui se situaient sur les plateformes littorales, dites beines lacustres carbonatées, généralement à proximité des reliefs encadrant le lac. Ces formations carbonatées datent de l'Holocène, en lien avec un réchauffement climatique global, entraînant ainsi la concrétion des apports calcaires pour aboutir à ces plateformes. Cette occupation stratégique se retrouve également à proximité des « molards » au nord du lac, qui sont anomalies géomorphologiques, mais surtout des paleo-îles du lac du Bourget (Rey et Dummont, 2015). Ces « molards » émergent du paléo-lac, et ont pu, durant les phases de transgression du Rhône jouer un rôle de déviation, impactant ainsi la morphologie et la direction du cours d'eau, protégeant certains sites. La proximité directe de la faille de Culoz avec ces « molards » est à mettre en lien, car c'est une zone active qui pourrait expliquer ces affleurements rocheux.

Dès lors, les installations anthropiques du passé sont situées dans des secteurs précis, où la topographie est relativement plate comme nous pouvons l'observer avec les baines lacustres carbonatées. Nous pouvons également relever que tous les villages archéologiques du Bronze, éparpillés sur les zones plates du littoral, ont dû être exposés à différents degrés aux risques de crue. Par exemple, le site archéologique Conjux est situé sur la zone d'impact directe de l'exutoire du lac communiquant avec le Rhône, c'est-à-dire zone soumise directement au risque de crue du Rhône. Or, nous savons que durant certaines crues violentes, le Rhône alimente le lac du Bourget, connectant ainsi le bassin versant permanent de 629km² à celui du Rhône de plus de 4000 km² (Chapron, 1999). En témoignent d'ailleurs la présence de « rides », synonymes de passage de courants hyperpycnaux¹⁶, visibles sur les données du MNT littoral (Annexe 13). Ces rides sont des indications de l'hydrodynamisme et de l'activité sédimentaire du site en temps de crue du Rhône.

Cette zone anciennement habitée était donc directement exposée aux risques, tandis que le site archéologique de Châtillon était quant à lui plus préservé grâce à la géomorphologie, avec la présence du rocher de Châtillon. De même pour le site archéologique d'envergure de la baie de Grésine, à l'abris des grandes crues du Rhône et autres cours d'eau.

Néanmoins, tous les sites restent exposés aux fluctuations « naturelles » du niveau du lac, d'origine climatique. Cela m'amène à me poser la question suivante, où se situe le paléo-littoral de l'Age du Bronze ? En me basant sur les recherches préexistantes, ce paléo-littoral a été estimé à 3,5m en dessous du niveau actuel, ce qui équivaut à un littoral à 228m d'altitude (Chapron et al, 2007). Ainsi, via la cartographie effectuée et la haute qualité du MNT de 2021, j'ai pu estimer le paleo-littoral sur ma carte. Il est important de soulever le fait qu'il y a des sites archéologiques qui se retrouvent tout de même noyé. Ainsi, je m'hasarde à émettre l'hypothèse que le niveau du lac aurait pu atteindre 227 m d'altitude, soit 4.5 m plus bas que le niveau actuel. Cette hypothèse reste une ébauche, et des études plus poussées pourraient être menées pour la confirmer ou non.

Ainsi, grâce à la cartographie du littoral et du paleo-lac, mais surtout des potentiels paleo-littoraux, j'ai pu corréliser l'occupation passée du littoral du Bourget avec la géomorphologie. Il est d'ailleurs important de relever que le paleo-lac du Bourget, dont la superficie est bien plus importante que le lac actuel (Figure 2) résulte de la progradation des deltas du Rhône au Nord, de la Leysse au Sud et du Sierroz à l'Est. Il est d'ailleurs important de rappeler que le delta de la Leysse est déporté sur la droite, à cause de l'effet de Coriolis (Chapron, 1999), expliquant ainsi sa morphologie.

Les activités anthropiques modernes se traduisent sur le lac par l'anthropisation des cours d'eau, comme nous pouvons l'observer sur le MNT du littoral, le chenal naturel du Sierroz a été dévié (Annexe 14). Au Nord le canal de Savières menant à une écluse, est la traduction même de la forte anthropisation du lac. Cet aménagement hydraulique permet un contrôle du niveau du lac, avec une « cote basse » à 231.2m d'altitude en hiver, et une « cote haute » à

¹⁶ Ecoulement de crue dont la densité de la masse arrivante est supérieure à celle de l'eau d'accueil, créant ainsi une crue plongeant directement en profondeur (Chapron, 1999).

231.5m d'altitude en été, par la CNR (Compagnie Nationale du Rhône) afin de garantir la navigation sur le plan d'eau (Miquet, 1997).

Parallèlement, nous pouvons également relever le fait que la forte présence de gaz au Nord du lac ainsi qu'au Sud (Chapron, 1999) est relative aux fronts deltaïques, qui rappelons le, sont des environnements instables. En effet, les sédiments sont riches en gaz provenant de la dégradation de la matière organique apportée dans le lac par les affluents (Sierroz, Leysse, Rhône) (Chapron, 1999). Etant donné la superficie du lac et sa profondeur, d'autres fenêtres d'observation sont présentes pour mener à bien les campagnes de recherches sédimentaires, laissant ainsi la possibilité d'étudier les strates sédimentaires. Contrairement à des lacs peu profonds et de petite taille, où les choix sont bien plus réduits.

Le rôle de la cartographie par Lidar vert ici est d'identifier les perturbations potentielles sur les milieux à préserver (exemple des roselières). Et par conséquent de prévoir les aménagements nécessaires et utiles à la préservation de ces milieux fragiles.

Le risque sismique, peut être enregistré dans les sédiments. C'est ce qu'ont montré les travaux de E. Chapron avec des dépôts de glissement identifiés dans le secteur nord du lac, et datés de 9400 ans cal BP et de 4500 ans cal. BP (Chapron 1999). Au Nord-Ouest, un dépôt de seiche traduisant un mouvement de balayage de l'eau créant ainsi un dépôt sédimentaire spécifique, marqueur d'un événement majeur (séisme), a pu être corrélé à un séisme de magnitude 5.5 à 6 sur l'échelle de Richter (Ledoux, 2010). Ainsi, ces glissements traduisent bien une activité sismique plus ou moins récente dans le lac, mettant en exergue la problématique du risque dans le territoire.

2) Le lac de maar d'Issarlès : un système lacustre alimenté par des cours d'eau torrentiels

Le lac d'Issarlès d'origine volcanique a été l'occasion pour moi de suivre une campagne géophysique de terrain. Le volet géomorphologique a été intéressant à étudier pour mieux comprendre la diversité des milieux lacustres. En plus d'être un lac d'origine volcanique venant compléter notre palette de connaissances, le lac d'Issarlès est soumis aux épisodes Cévenoles impliquant ainsi des pluies diluviennes d'influences méditerranéennes qui alimentent les cours d'eau torrentiels. Ces cours d'eau torrentiels sont très visibles dans le lac d'Issarlès, avec des canyons qui viennent inciser le substrat par leur action érosive et apportent avec eux une grande quantité de sédiments des versants, qui, accentués par la forte pente dans le lac viennent s'accumuler au pied de pente formant alors des fans deltas. Nous

pouvons notamment les sur les données multifaisceaux générées par EDF en 2012, et traitées par Ahmadou Bamba Sarr en 2022. La superposition du Lidar de 2021 avec les données d'EDF produit un MNT de haute qualité mettant en exergue la géomorphologie. Mon travail a donc permis de compléter cette base de données préexistantes (Figure 13).

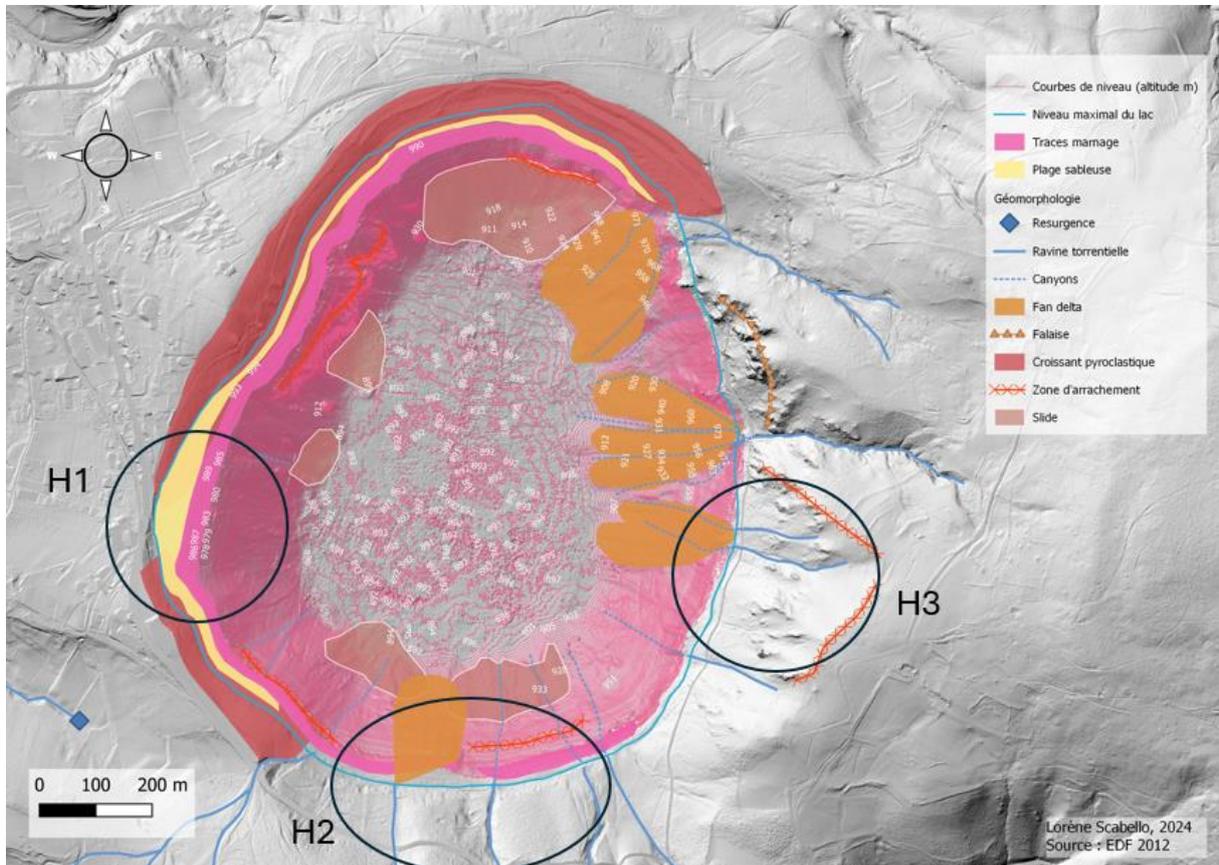


Figure 13 : Carte géomorphologique du lac d'Issarlès, et hypothétiques zones pouvant expliquer les glissements (H1 ; H2 ; H3)

Nous pouvons également observer des traces de potentiels glissements dans le lac au Nord, comme au Sud (Figure 14). Cela a été confirmé par la campagne effectuée sur le terrain, où l'on a pu visionner la topographie sédimentaires, qui révélait des zones de remaniements au Nord du lac notamment. Ces remaniements gravitaires au sein du lac sont largement accentués par ses fortes pentes dévalant jusqu'à 108m de profondeur. La particularité et l'intérêt de ce lac sont également son anthropisation. En effet, comme cité précédemment, le lac sert de réserve hydrologique, et son niveau est contrôlé par EDF. Il subit dans d'importants marnages, qui ont d'ailleurs marqué les littoraux. Ces changements de niveaux viennent ainsi perturber le fonctionnement « naturel » du lac.

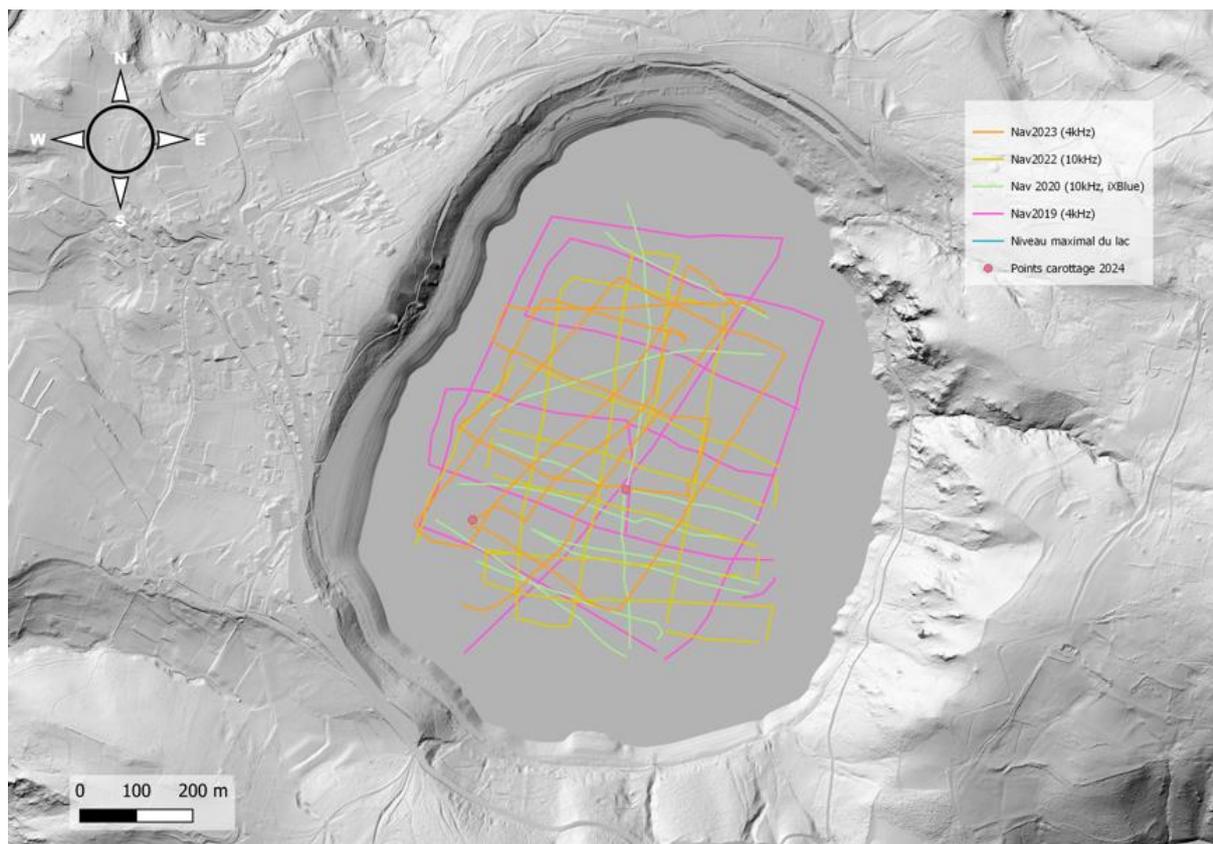


Figure 14 : Grille de navigation des différentes campagnes pour la sismique réflexion

De plus, nous pouvons nous interroger sur la source des glissements anciens majeurs (datant d'il y a environ 8000ans (Defive et al, 2023)) visibles sur les données sismiques réflexion de 2022 (Figure 11). Nous pouvons observer qu'à l'ouest du lac, le croissant pyroclastique présente une zone de rupture, une discontinuité. La première hypothèse serait que les glissements viendraient de ce croissant pyroclastique, qui se serait effondré dans le lac. La seconde hypothèse avancerait que les glissements viennent de la loupe d'arrachement présente au Sud du lac. La troisième hypothèse situerait la source du glissement majeur à l'ouest du bassin, où nous pouvons également observer une loupe d'arrachement conséquence (Defive, 2023).

L'activité sismique récente de la vallée du Rhône avec le séisme du Teil en 2019 dont le foyer se situe au Sud de Montélimar (Annexe16) (Larroque, et al, 2020), permet d'appuyer les potentiels impacts de la sismicité sur ce lac volcanique.

3) Les lacs pro-glaciaires de la Neste d'Oô : lac d'Oô, lac d'Espingo et lac Saussat

Les 3 lacs pro-glaciaires de la Neste d'Oô que j'ai eu l'occasion d'étudier sont venus imposer certaines limites à la cartographie lacustre. Ces lacs d'ombilic glaciaire sont les héritages du passage d'un glacier qui a érodé toute une vallée sur son passage (Figure 15).

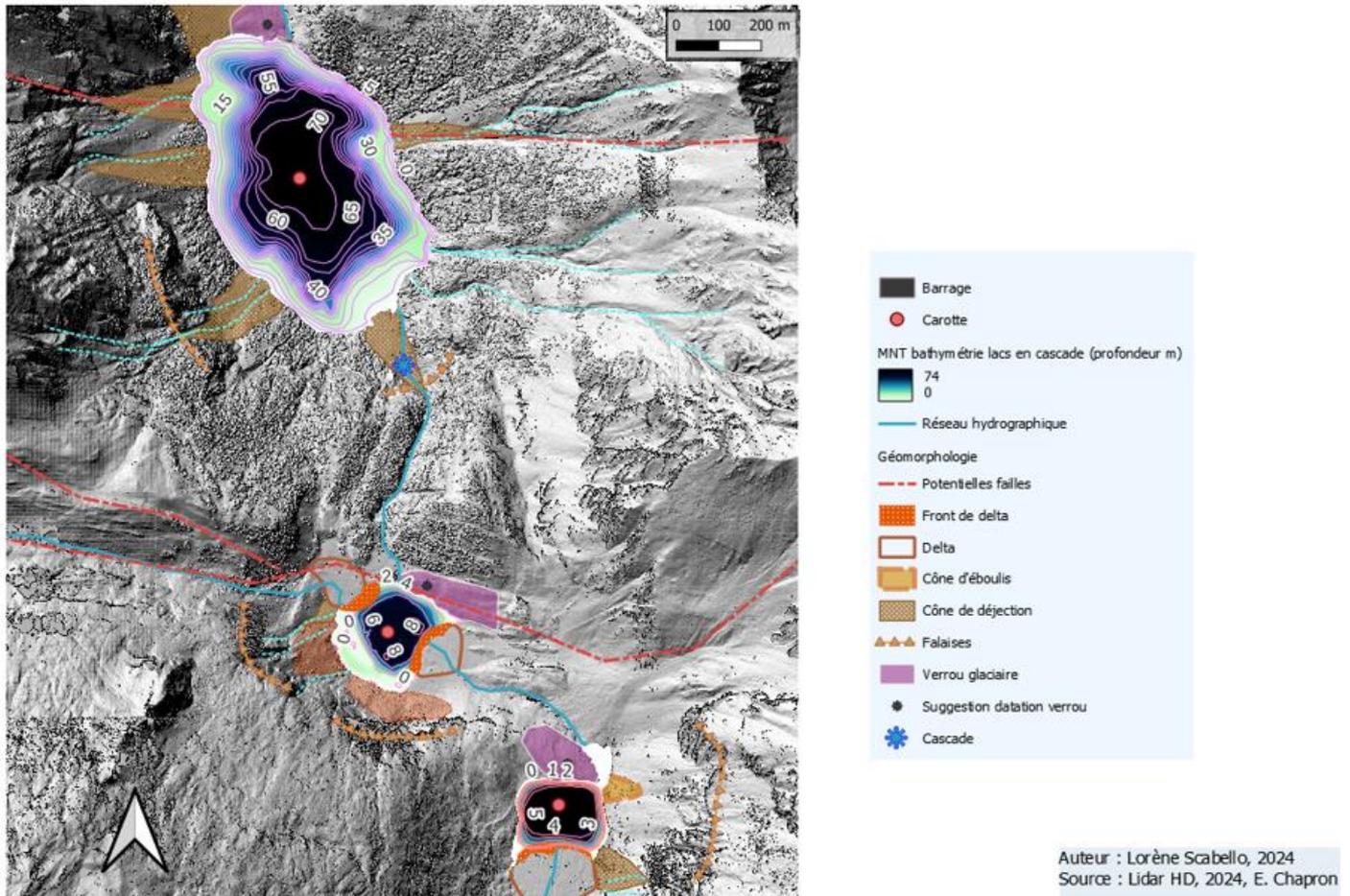


Figure 15 : carte topo-bathymétrique et géomorphologique des lacs en cascade de la Neste d'Oo

Le lac d'Oô :

La carte topo-bathymétrique du lac d'Oô réalisée à partir de la carte de L. Gaurier datant de 1919, combinée aux données Lidar HD 5m de l'IGN permet de se rendre compte de la géomorphologie du lac et de son littoral. Les fortes pentes qui l'entourent produisent des cônes de déjection, qui sont alimentés par le bassin de réception en amont, dont les eaux s'écoulent par des ravines érodées (Figure 16), pour enfin s'accumuler en aval, formant ainsi des cônes.

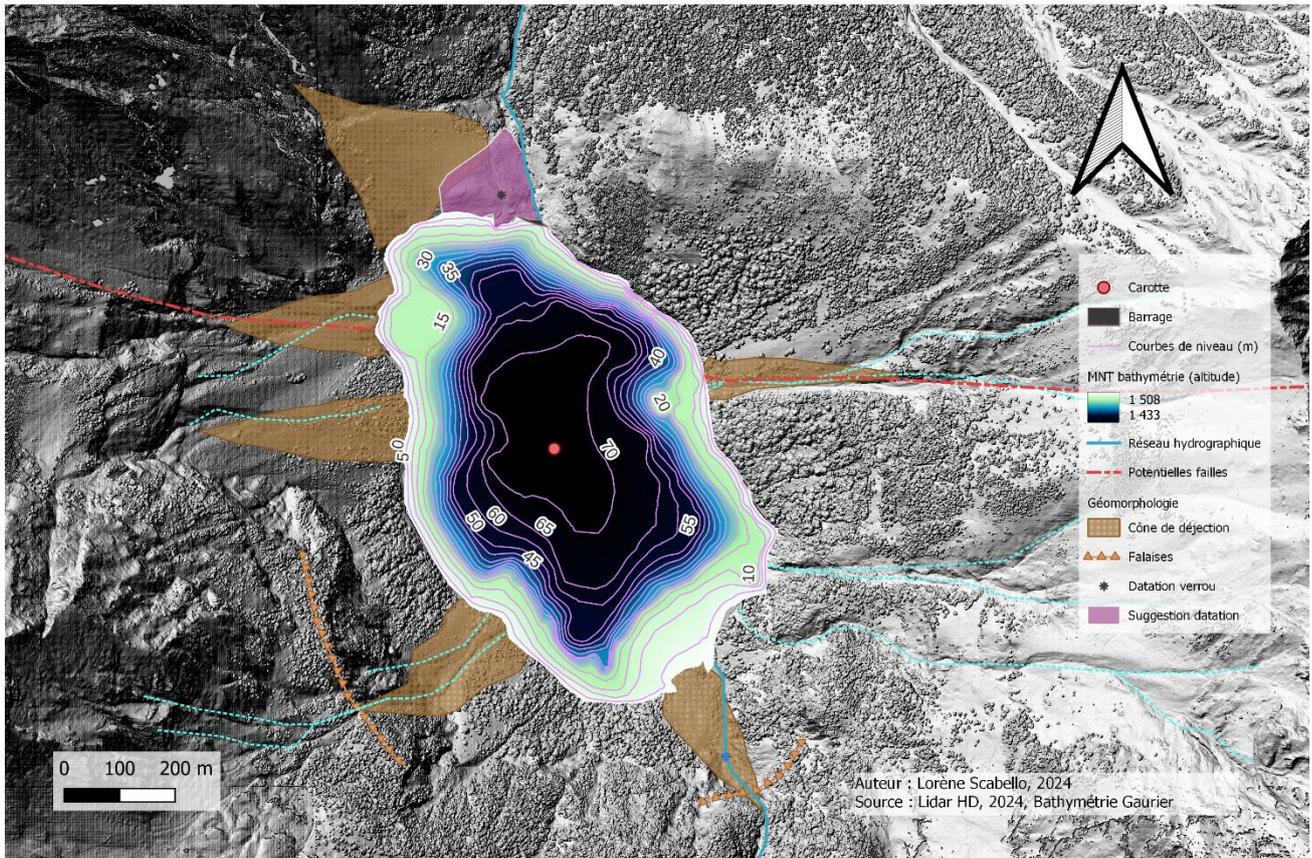


Figure 16 : carte géomorphologique et topo-bathymétrique du lac d'Oô

Le lac d'Oô est historiquement un lac naturel sur lequel a été construit un barrage en 1921, barrage qui a ennoyé le lac rehaussant son niveau initial. Ainsi, les cônes de déjection subaquatiques sont originellement aériens, mais désormais immergés (Annexe 17). Contrairement au lac d'Issarlès dont le niveau est revu à la baisse ou au lac du Bourget dont le niveau fluctue saisonnièrement, le niveau du lac d'Oô est également contrôlé dans le cadre de la gestion du risque de crue (Lacou, 2021), laissant un marnage important (Annexe 17).

Parallèlement, les données Lidar montrent leurs limites en contexte de haute-montagne, car la topographie étant trop intense vient perturber la résolution de l'appareil aéroporté. Ainsi, la donnée Lidar utilisée ici est « brute » à certains endroits, c'est-à-dire qu'elle n'a pas été nettoyée et qu'il reste les formations superficielles telles que la végétation. Néanmoins nous distinguons une potentielle faille qui serait la prolongation de la faille de la Maladeta (Chapron et al, ASF, 2022), qui selon les données sismiques, perturbe le remplissage récent du lac (Annexe 18).

De plus, rappelons que le lac d'Oô est situé dans une zone sismique active, au sein de laquelle des tremblements de terre historiques ont été enregistrés (ex : Bagnère-de-Bigorre

1660). La trace de ce tremblement de terre est d'ailleurs visible dans l'unique carotte sédimentaire du lac, où l'on peut observer une turbidite plus claire. Les données sismiques nous laissent également percevoir ce qui pourrait correspondre à une faille passant dans le lac (Annexe 18), faille que nous avons représenté sur la carte en se basant que la géomorphologie du Lidar. Si nous nous référons à la carte géologique du lieu, nous pouvons observer que cette faille correspond à une zone de changement lithologique (Annexe 21). A l'aide des datations C14 ainsi qu'au pic de Cs137 et AM241 à 9cm, Emmanuel Chapron a pu dater la turbidite et émettre l'hypothèse que cette turbidite correspondrait bien au séisme de 1660. Les archives historiques jouent un rôle important dans l'identification de ce type d'évènement, en mettant en lien les différentes pièces du puzzle des archives environnementales.

L'étude des strates sédimentaires via la sismique réflexion et l'analyse de carottes permettent aussi d'enrichir les données sur le paléoenvironnement. Ainsi, grâce à la sismique réflexion de la zone à proximité de la cascade, nous pouvons observer la progradation du cône de déjection alimenté par la cascade. La coupure est nette entre les strates sédimentaires et l'avancée du cône (Annexe 19).

Ces datations radionucléides permettent donc de dater les évènements et plus largement de calculer la vitesse de sédimentation moyenne. Il semblerait qu'en raison de sa profondeur et de sa position en aval des 2 autres lacs, qui piègent la majeure partie des sédiments, il soit tout à fait logique que sa vitesse de sédimentation soit particulièrement lente.

Le lac d'Espingo :

Situé juste au-dessus du lac d'Oô, le lac d'Espingo est plus petit que son voisin et est encadré par 2 deltas ainsi que par des écroulements rocheux dont la continuité subaquatique est rendue visible par les données bathymétriques générées par la sismique réflexion (figure 17) . Ces écroulements sont explicables par les falaises qui surplombent le lac. De plus, avec la potentielle prolongation de la faille active de la Maladeta et donc un contexte séismique, les environnements sont plutôt instables. Ce manque de stabilité vaut également pour les cours d'eau, qui comme nous pouvons l'observer migrent au cours du temps. Cela est particulièrement visible sur les deltas qui progradent, où l'on observe des chenaux plus ou moins creusés. Cette progradation est nettement visible sur la bathymétrie au niveau des fronts des deltas. Ces formations deltaïques sont d'ailleurs des environnements sédimentaires produits de la déglaciation, et de l'apport actuel sédimentaire par les cours d'eau.

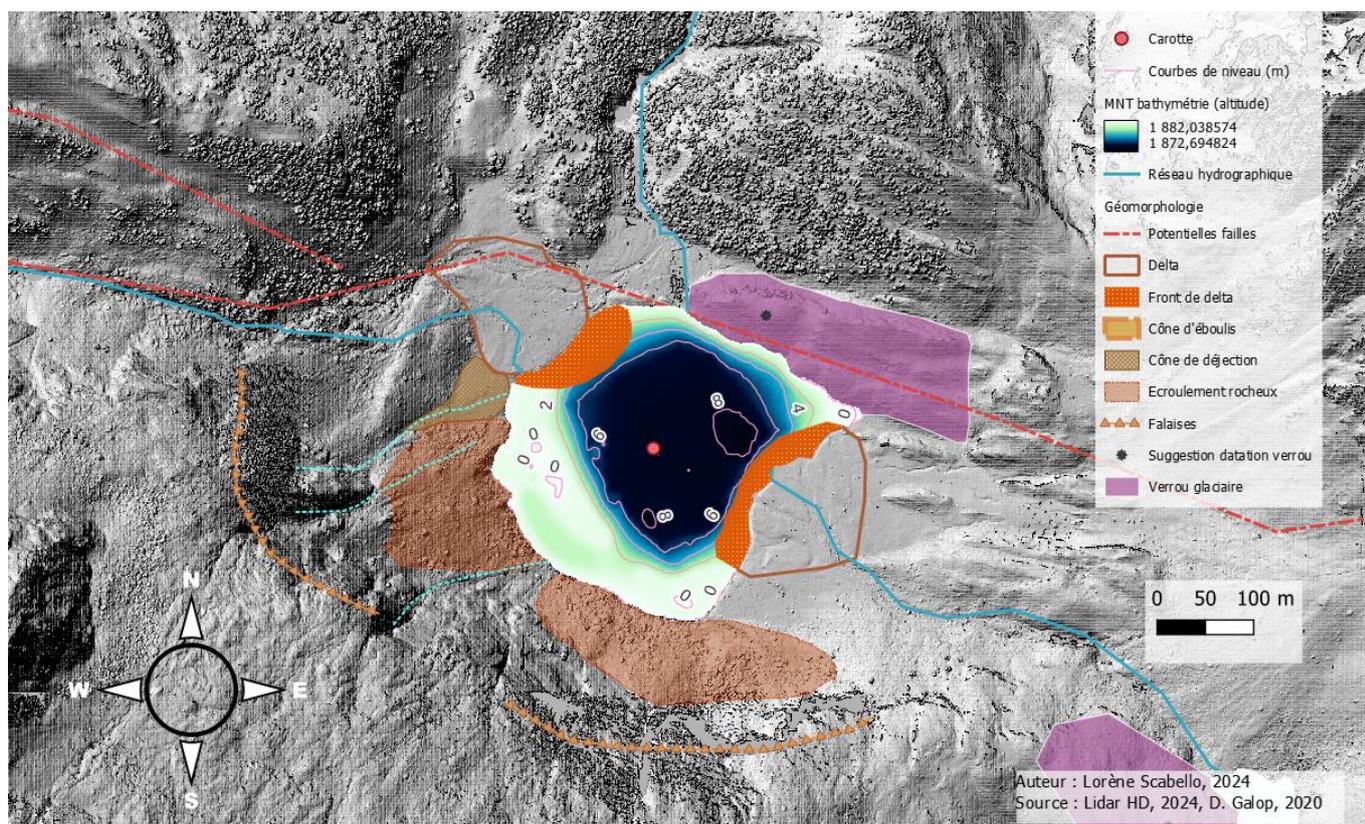


Figure 17 : carte topo-bathymétrique et géomorphologique du lac d'Espingo

Avec ses 7m de profondeur environ, le lac d'Espingo est destiné à être comblé. Sa vitesse de sédimentation, bien qu'inférieure à celle du lac Saussat, est doublement supérieure à celle du lac d'Oô avec 0.05cm par an environ. Si cette vitesse de sédimentation est constante, le lac serait comblé dans 14 000 ans¹⁷, sauf si une nouvelle ère glaciaire débute.

De plus, en m'appuyant sur la visualisation des données sismiques du lac d'Espingo, j'ai pu observer au sud du lac, au niveau de l'embouchure de la Neste d'Oô dans le lac, une incision, montrant la dynamique du delta et de son canyon qui vient creuser dans les sédiments. Le système deltaïque avance sur le système lacustre, et la rivière va quant à elle creuser son lit, créant ainsi des canyons le long du prodelta. Le delta peut ainsi être alimenté par le biais de ce canyon et suggère que ce lac peut être exposé à des crues intenses et érosives (courants hyperpyconaux) comme beaucoup de lacs glaciaires d'altitude.

¹⁷ 700 (profondeur du lac en cm) * 1 (année) / 0.05 cm = 14 000 ans

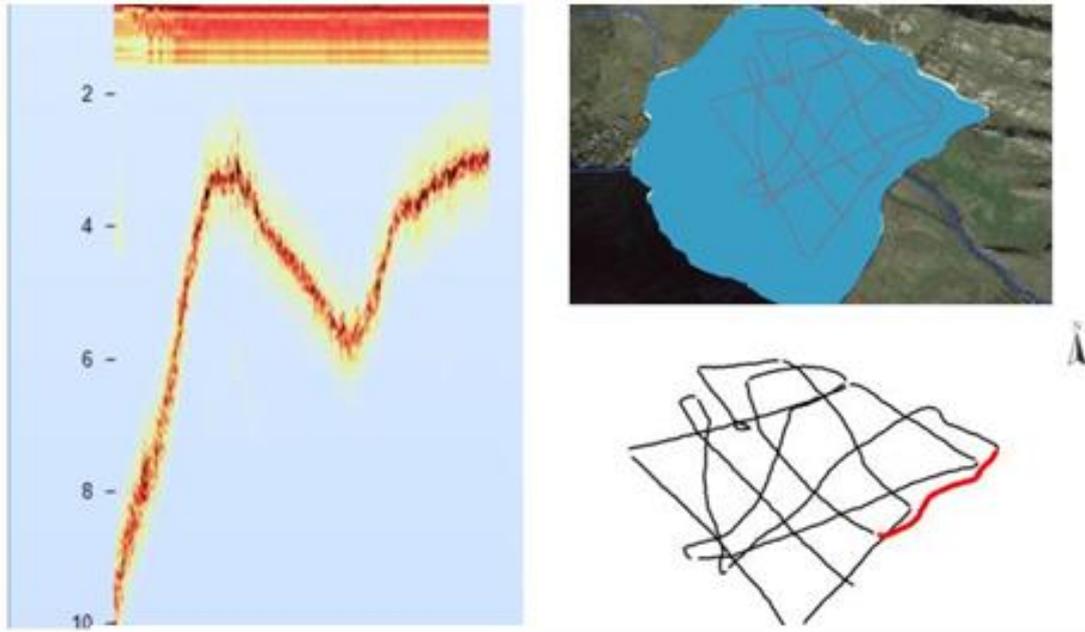


Figure 18 : profil sismique lac d'Espingo, 200kHz

Le lac Saussat :

Le lac Saussat est le lac en amont du lac d'Espingo et du lac d'Oô (Figure 15). Il est bordé par un delta au Sud et son verrou d'ombilic glaciaire se situe au Nord du lac (Figure 19). Contrairement aux données sismiques du lac d'Espingo sur lesquelles nous pouvons observer un net canyon au niveau de l'embouchure de la Neste d'Oô, les données sismiques du lac Saussat n'ont pas une assez bonne résolution et ne laissent apparaître aucun chenal / canyon. On pourrait éventuellement distinguer ce qui semblerait être des chenaux mais la mauvaise qualité des données ne permet pas de le confirmer (Annexe 20).

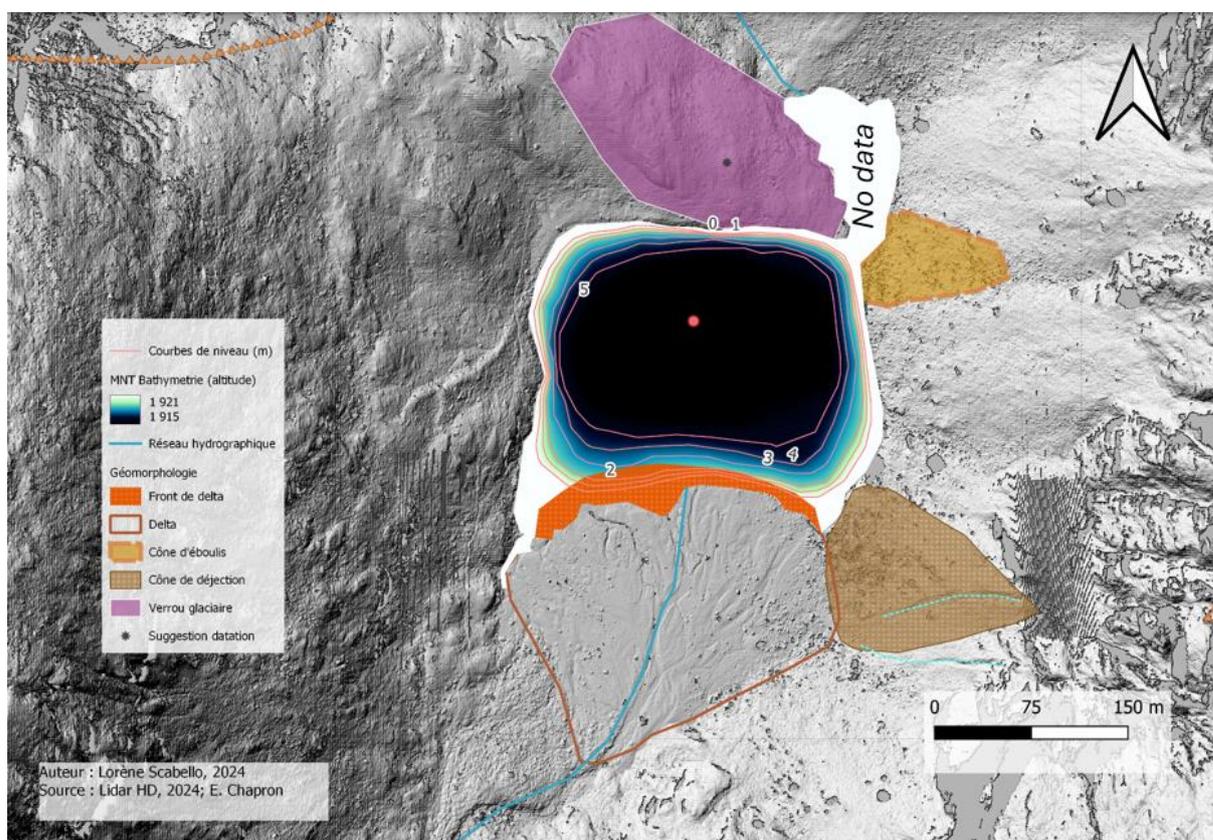


Figure 19 : carte topo-bathymétrique et géomorphologique du lac de Saussat

En raison de sa faible profondeur de 5m environ, les données sismiques sont en effet mauvaises. Nous ne distinguons pas les strates sédimentaires (Annexe 20). Cela est notamment dû au piégeage du gaz dans les sédiments, en raison de la matière organique transportée par les cours d'eau (Chapron, 1999). Ayant une vitesse de remplissage sédimentaire supérieure aux deux lacs en aval (0,08cm /an), le lac de Saussat est le système lacustre qui piège le plus les sédiments parmi nos 3 lacs d'étude de la Neste d'Oô. Si l'on se

base sur cette vitesse de sédimentation, et que nous partons du principe qu'elle reste constante, le lac se comblerait en 6250ans¹⁸ et serait le premier des 3 à être comblé.

Je me suis donc appuyée sur les données Lidar de l'IGN mais également sur la carotte sédimentaire LS22-2 afin de mener mon étude.

La carotte ci-dessous met en valeur un dépôt clair synonyme d'un évènement rapide et plus grossier. En combinant cela aux données XRF et aux données de susceptibilité magnétique, nous avons pu observer qu'un pic de calcite était présent à la même hauteur que la turbidite. Or, le bassin versant de la Neste d'Oô ne présente aucune roche calcaire. Ainsi, en nous appuyant sur des données historiques, nous avons pu poser l'hypothèse que cette turbidite pourrait être liée à l'accident du barrage du lac du Portillon d'Oô de 1929, où les mines ont cédé entraînant une grande crue dans la vallée. Pour explorer cette piste, il faudrait lier ces données avec les données 210Pb et 137Cs pour dater avec précision l'évènement.

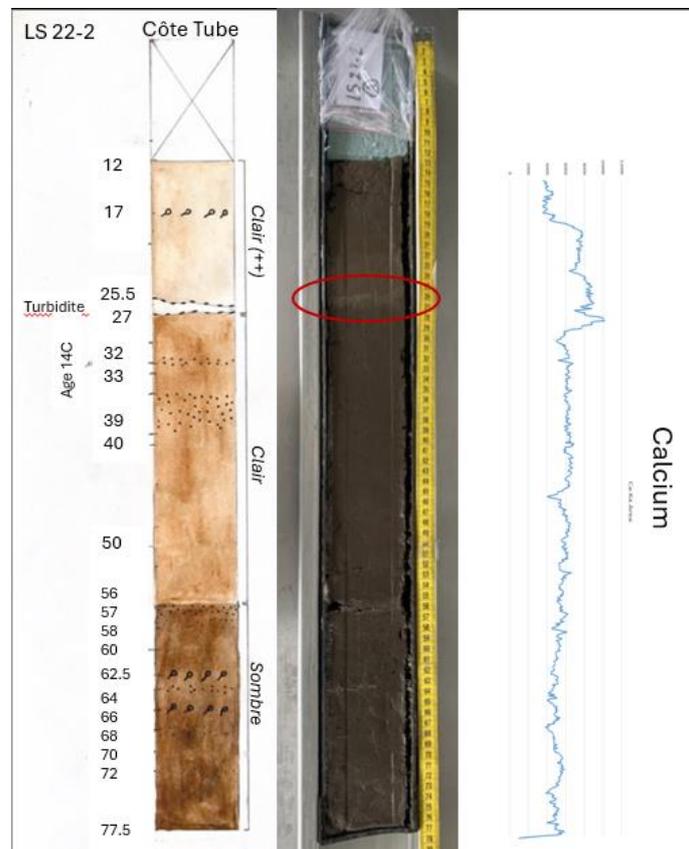


Figure 20 : carotte LS22-2 et son schéma + valeurs XRF du calcium Calcium - Ca

Ainsi, l'impact anthropique, que ce soient les fluctuations de la végétation sur le bassin versant au cours du temps (Baty, 2024) pouvant être suivi et analysé dans les carottes sédimentaires via la palynologie, ou encore les évènements brusques (turbidite) induits par des aménagements majeurs des lacs en amont, sont enregistrés dans les sédiments lacustres à Saussat.

¹⁸ 500 (profondeur du lac en cm) * 1 (année) / 0.08 cm = 6250 ans

Les exemples de nos lacs pyrénéens montrent à quel point les archives sédimentaires sont importantes pour mieux comprendre les dynamiques environnementales et mieux retracer les paleo-environnements à l'échelle d'un bassin versant.

V) Discussion

1) Critiques et perspectives

L'étude de ces lacs de montagne s'est révélée très enrichissante et la possibilité d'aller sur le terrain pour chacun d'entre eux fut malheureusement compliquée. Par chance, j'ai tout de même pu assister à une partie de la campagne de terrain au lac d'Issarlès. Néanmoins, la géographie de terrain reste essentielle pour approfondir sa réflexion et pousser l'étude afin d'avoir une vision plus réaliste.

Parallèlement, d'un point de vue technique, l'utilisation du Lidar vert dans l'approfondissement de l'étude des littoraux lacustres et plus largement des systèmes lacustres, semblerait être intéressant pour mieux comprendre leur topographie subaquatique, dans un détail inédit. Cette technologie, tout comme le Lidar « classique », est une véritable révolution dans le domaine de la géographie, et permet une approche bien plus fine par voie aérienne. De plus, avec le contexte du changement climatique et de l'impact anthropique, les études lacustres et notamment celles sur l'évolution de leurs littoraux qui sont l'interface entre la terre et le milieu aquatique devraient être approfondies, pour mieux anticiper les risques auxquels font face les aménagements et populations installées dans ces zones fragiles et dynamiques.

Bien que le Lidar soit une prouesse technologique dans l'étude de ces milieux et plus largement dans le monde scientifique, il se heurte à quelques limites de l'ordre de l'identification des objets archéologiques (ex : pieux en bois sur les sites archéologiques du lac du Bourget). De même dans les zones de fortes pentes, où la topographie limite largement la qualité des données. Au contraire, sur des surfaces planes, les irrégularités se distinguent très bien avec un détail impressionnant. Ainsi, des analyses de terrain complémentaires à la donnée Lidar semblent aujourd'hui essentielles pour garantir un résultat complet.

De même, sur les cartes bathymétriques du lac du Bourget à partir de la digitalisation de données numérisées, j'ai pu observer des artefacts qui viennent fausser la bathymétrie à certaines zones (Annexe 15). Le travail nécessaire de nettoyage des données brutes est très chronophage. Cela souligne une certaine limite de l'outil des SIG.

De plus, le travail cartographique réalisé sur les lacs en cascade de la Neste d'Oô pourrait permettre dans un futur proche de dater la formation des verrous d'ombilics avec les isotopes cosmogéniques Be10 (2025) et donc de dater la formation de nos plans d'eau, contribuant ainsi à l'approfondissement de l'étude limnologique, mais également l'étude sur le retrait des glaciers avec les changements climatiques passés (travaux prévus pour 2025). Concernant le volet sédimentologique, il faudrait pousser l'étude de la carotte sédimentaire du lac Saussat, et

s'appuyer sur la carotte LS23-1, prélevée avec le carottier Kajak Core. En effet, la carotte sédimentaire sur laquelle j'ai travaillé se base sur la LS22-2 qui a subi un effet de compaction pouvant fausser les études et les datations. De plus, enrichir ces données via d'autres approches (polliniques, micro-fossiles, charbons...) permet d'avoir une vision plus globale de l'évolution du bassin versant, en corrélant les diverses informations.

En termes de recherche, s'intéresser au littoral du lac du Bourget, et à son paleo-littoral serait une véritable perspective d'étude de modélisation des risques littoraux tsunamis par glissements subaquatiques, notamment en mettant en lien des données actuelles avec des données historiques pour mieux comprendre ces systèmes, et mieux anticiper d'éventuels risques. Rappelons que certains lacs de la région, notamment le lac d'Aiguebelette a été l'objet d'études sur la modélisation d'un paléotsunamis, et que nous retrouvons des glissements communs vers 9400 ans cal. BP dans le lac d'Aiguebelette, le lac Paladru, ainsi que dans le Bourget. Ainsi, l'étude des paléotsunamis et donc du risque actuel associé est une réelle perspective d'étude.

2) Retour d'expérience

Ce stage au sein du laboratoire GEODE s'est déroulé en plusieurs étapes. J'ai mis du temps à m'investir pleinement dans le stage dès le début, notamment dû au surplus d'informations reçues et aux nouvelles connaissances à acquérir. N'ayant que très peu de savoirs sur la sédimentologie, ça a été pour moi l'occasion d'enrichir mes bases inexistantes en m'appuyant sur les riches connaissances de mon tuteur de stage, ainsi que sur la bibliographie à disposition. Le fait de traiter plusieurs lacs en même temps m'a parfois un peu perdu, mais j'ai fini par trouver mon rythme de travail en m'organisant et gérant mes différents terrain d'étude en fonction de mon avancée. La confiance que m'a accordé mon tuteur m'a réellement permis de naviguer librement et à mon rythme entre les différentes missions qu'il m'avait confiées, tout en me laissant l'autonomie nécessaire pour que je puisse optimiser l'organisation de mon travail.

La partie théorique avec la bibliographie a sans doute été la plus lourde et la plus complexe, avec la lecture d'articles scientifiques parfois très techniques et poussés. Mais cela a renforcé ma méthodologie de lecture et de prises de notes, tout en enrichissant profondément mes savoirs. Cela m'a permis de m'immerger dans mes zones d'étude, à travers les lignes de texte que je consommais à outrance.

Travaillant de chez moi, au laboratoire, ou encore à la bibliothèque du Mirail avec un camarade qui m'a permis, durant l'étape fastidieuse des premiers traitements de données Lidar de me motiver et de m'aider face aux difficultés rencontrées, le travail sous logiciel SIG m'a beaucoup stimulé. En effet, la cartographie est pour moi une façon à part entière d'étudier un territoire. D'autant plus qu'en réalisant des cartes du paleo-lac du Bourget, je me suis plongée dans un autre temps, me donnant une tout autres vision du territoire. Cette prise de recul via la cartographie, est selon moi essentielle dans le travail d'un.e géographe.

Le changement de date pour la soutenance et donc pour la fin de rédaction du mémoire m'a obligé à accélérer le rythme et trouver ainsi une motivation plus forte pour achever les écrits. Bien que la rédaction ait commencée dès les premières semaines de stage, il m'a été difficile d'avancer à mon gré, je me suis plutôt attelée à approfondir l'aspect cartographique.

Parallèlement, la possibilité d'avoir vu une campagne de terrain à Issarlès, et d'avoir pu traiter les carottes prélevées en 2024 (bien que pas terribles), fut une réelle expérience profitable et stimulante, me sortant un peu la tête de l'ordinateur. Il reste essentiel de combiner le terrain dans toute étude géographique.

Je suis donc satisfaite des apports généraux du stage, bien que le début ait été complexe pour moi. Et j'en sors pleine de nouvelles connaissances sur les différents pans de la géographie que j'ai pu traiter.

3) Liens avec le master

Le master GEMO (Gestion et Evaluation des zones Montagnardes), est comme son nom l'indique plutôt centré sur l'aspect gestionnaire de l'environnement, plutôt que sur l'aspect de géographie physique que j'ai pu traiter durant mon stage. En effet, bien trop de matières tournent autour de l'humain ou sont au contraire hors-sujet avec la formation.

Malgré tout, mon stage rejoint de multiples points abordés en cours, notamment dans l'UE *Socio-écosystèmes montagnards* dans laquelle l'aspect physique dans la compréhension des zones montagnardes est demeuré majoritaire. L'intérêt du stage a donc été, en partie, d'approfondir ces problématiques, en développant cet aspect de géographie physique peu explorée dans la formation.

Conclusion

Dans quelles mesures les changements climatiques et les activités anthropiques sont-ils des facteurs d'évolution et d'influence des dynamiques géomorphologiques des milieux lacustres en milieu montagnard et quels sont les potentiels risques / aléas associés ?

Les lacs de montagne font face à de nombreux facteurs extérieurs ayant des impacts plus ou moins directs sur leur système global. Que ce soient les variations climatiques ou les actions anthropiques, le système lacustre est en perpétuel évolution. Ainsi, l'élévation du niveau des eaux due à des périodes climatiques plus chaudes et donc à la fonte des glaciers, ou bien des périodes plus humides avec des crues plus fortes vont exercer une influence directe sur les formations lacustres (exemple de la transgression du Rhône)(Chapron, 1999). L'exemple du lac du Bourget, dont le niveau a fluctué (en témoignent les sites archéologiques), est typique d'un système lacustre subissant les variations de son environnement en raison de forçages climatiques. De plus, la géomorphologie des lacs est également impactée par des éléments extérieurs qui sont en interrelation (topographie, failles actives). Cela joue ainsi sur la variabilité des apports sédimentaires, et donc sur la géomorphologie des lacs.

Les aménagements hydroélectriques influent également sur les modifications géomorphologiques des lacs. En effet, ces derniers par la fluctuation plus ou moins régulière du niveau d'eau, l'aménagement de canaux (exemple du canal de Savières dans le lac du Bourget), vont modifier les trajectoires évolutives de la morphologie des lacs, en modifiant le sens de l'écoulement des eaux ou bien en redirigeant les cours d'eau.

D'autres activités anthropiques telles que le pastoralisme induisant un déboisement du bassin versant plus ou moins important, ont également des impacts sur la géomorphologie lacustre. En effet, les apports sédimentaires dépendent entre autres de la végétation, et vont augmenter quand celle-ci est absente induisant une augmentation de l'érosion des sols et créant ainsi de plus forts apports dans les lacs concernés.

Selon le contexte géologique, et géographique des lacs, ils sont soumis plus ou moins directement à des risques importants, tels que des mouvements de masse (Ledoux, 2010), ou glissements subaquatiques, enregistrés dans les sédiments et potentiellement tsunamigéniques.

Ainsi, qu'importe le contexte, la taille, ou la profondeur des lacs, ils font tous face à des problématiques de variation plus ou moins intenses de leurs littoraux, d'origine anthropiques, climatiques, tectoniques à des échelles temporelles plus ou moins larges (ex : progradation des deltas).

L'étude de la sédimentologie apparaît ici comme une étude complémentaire aux formations de surface, permettant de pousser la réflexion encore plus loin, et en révélant des informations non disponibles sur cette même surface. Les lacs sont donc des archives environnementales précieuses grâce aux datations, permettant d'anticiper à minima le futur des petits lacs (comblement). Plus globalement, l'analyse multi-proxy est essentielle pour mieux comprendre les dynamiques et évolutions du bassin versant.

Parallèlement, l'amélioration des connaissances est possible grâce aux technologies de cartographie (Lidar, Lidar Vert, bathymétrie multifaisceaux, sondeurs de sédiments, sismiques réflexion) qui sont des outils précieux pour pousser l'étude des environnements lacustres. En effet, les études géomorphologiques peuvent être directement liées à la gestion et à la préservation de l'environnement.

Ainsi, nous comprenons que les lacs sont des environnements très dynamiques, avec des littoraux instables. Il est donc nécessaire de les étudier et les comparer à des études sédimentaires similaires dans les environnements les plus profonds des lacs, zones qui sont censées être mieux préservées des fluctuations littorales. Néanmoins même les profondeurs des lacs sont soumises aux perturbations (exemple de l'avalanche sédimentaire du lac d'Oô), fournissant ainsi un potentiel de préservation des dépôts évènementiels. Certains lacs, par leur géomorphologie restent tout de même plus difficiles à cartographier (faible profondeur, présence de gaz faisant écran...), compliquant ainsi les études sur ce sujet.

La grande diversité des lacs étudiés et leurs spécificités offrent un socle solide pour mieux comprendre les risques associés aux milieux lacustres, et par conséquent mieux les gérer.

Ce stage ouvre donc une fenêtre de réflexion sur l'avenir de nos lacs de montagne, et l'apport de leur étude dans le contexte actuel du changement climatique.

Bibliographie

Articles scientifiques :

- **Amelot F., Delannoy J.-J., Nicoud G.**, 2003, *L'édification des cônes de déjection en zone de montagne : intérêts paléoenvironnemental et hydrogéologique, contribution typologique*, Quaternaire, 14-4, pp. 253-263.
- **Assier-Rzadkiewicz, S., Heinrich, P., Sabatier, P.C., Savoye, B., & Bourillet, J.F.**, 2000, *Modélisation numérique d'un tsunami provoqué par un glissement de terrain : l'événement de Nice en 1979*. Géophysique pure et appliquée, 157 - 10, pp.1707 – 1727.
- **Bauer B.O., Davidson-Arnott R.G.D., Hesp P.A., Namikas S.L., Ollerhead J., Walker I.J.**, 2009, *Aeolian sediment transport on a beach : Surface moisture, wind fetch, and mean transport*, Geomorphology, 105-1, pp. 106-116.
- **Billaud Y.**, 2019, *Les palafittes des lacs savoyards : Du bâtiment au territoire, quels éléments d'interprétation ?* Entre Terres et Eaux, Les sites littoraux de l'âge du Bronze : spécificités et relations avec l'arrière-pays, Société Préhistorique française, séance 14, pp. 47-65.
- **Billaud Y.**, 2018, *Sur les rives du lac du Bourget à la fin de l'âge du Bronze*, Cahiers de géographie, 20, pp.317-331.
- **Brigand R., Billaud Y.**, 2019, *L'habitat Néolithique final de Beau Phare à Aiguebelette-le-Lac (Savoie) : nouvelles approches méthodologiques de la planimétrie d'un village littoral de l'arc alpin*, Bulletin de la Société préhistorique française, 116-4, pp. 681-704.
- **Chapron E., Arnaud F., Marguet A., Billaud Y., Perdereau L., Magny M.**, 2005, *Evolutions des paléoenvironnements alpins durant l'Age du Bronze : apports des archives sédimentaires littorales et profondes du lac du Bourget (Savoie, France)*, Colloque « Le Temps » du CTHS, pp. 11.
- **Chapron E.**, 2006, *Les environnements sédimentaires récents du Lac du Bourget*, Autour du Lac du Bourget, Actes du colloque pluridisciplinaire, pp 11.

- **Chapron E., Van Rensbergen P., De Batist M., Beck C., Henriet P.,** 2004, *Fluid-escape features as a precursor of a large sublacustrine sediment slide inlake Le Bourget, NW Alps, France*, Terra Nova, 16-5, pp. 305-311.
- **Chesselet R.,** 1970, *Présentation de quelques méthodes de datation par les nucléides radioactifs appliquées à l'étude de la sédimentation marine*, La houille blanche, 8.
- **Couteaux M.,** 1984, *Recherches pollenanalytiques au lac d'Issarlès (Ardèche, France) : évolution de la végétation et fluctuations lacustres*, Bulletin de la Société Royale de Botanique de Belgique, 117 – 1, pp. 197-217.
- **Defive E., Miallier D., Pilleyre T., et al,** 2023, *New investigations about three young volcano-sedimentary systems of velay-vivarais (France) and co-evolution humans-volcanoes in the background*, Quaternaire, 34 - 2, pp. 93-122.
- **Gauchon C.,** 2021, *Paysages et usages des lacs alpins*, Cahiers de géographie, 21-1, pp.127-138.
- **Guillemain P.,** 2009, *La spectrométrie de fluorescence X : principes et applications*, Techniques de l'ingénieur.
- **Hansen L., Waldmann N., et al,** 2016, *Morphological signatures of mass wasting and delta processes in a fjord-lake system : insights from Lovatnet, western Norway*, Norwegian Journal of Geology, 96-3.
- **Higounet C.,** 1934, *Notes sur la morphologie de la haute vallée de la Neste d'Oo*, Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest, 5- 1, pp. 92-98.
- **Hosman S.L., Fabbri S.C., et al,** 2024, *Exploring beneath the retreating ice : swath bathymetry reveals sub-to proglacial processes and longevity of future alpine glacial lakes*, Annals of Glaciology 1-6.
- **Lauterbach S., Chapron E., Brauer A., Hüls M., et al,** 2010, *A sedimentary record of Holocene surface runoff events and earthquake activity from Lake Iseo (Southern Alps, Italy)*, The Holocene 1-12.
- **Laverdière C.,** 1981, *Les types de littoraux des lacs Mistassini et Albanel, Québec*, Géographie physique et quaternaire, 35–3, pp.329-343.
- **Maleval V.,** 2020, *Suivi géomorphologique du littoral lémanique de Thonon-les-Bains (France, Haute-Savoie)*, Dynamiques Environnementales – Journal international des géosciences et de l'environnement, 2020-45, pp.89-102.
- **Martin C.,** 2017, *Fonctionnement hydro-sédimentaire et bilan sédimentaire du lac de Saint-Germain-de-Confolens (Charente, France) : paramètres géomorphologiques à prendre en considération dans la gestion du lac*, Physio-géo, 11, pp. 197-227.

- **Martin J., Lefevre C.,** 2019, *Comparaison des systèmes Lidar vert et bleu pour la cartographie des eaux côtières*, Journal Français de Télédétection.
- **Magny M.,** 1992, *Sédimentation et dynamique de comblement dans les lacs du Jura au cours des 15 derniers Millénaires*, Revue d'archéométrie, 16-1, pp. 27-49.
- **Miquet A.,** 1997, *La régulation du lac du Bourget (France) : nouveau fonctionnement hydraulique, impacts environnementaux*, Revue de géographie alpine, 85-2, pp.11-21.
- **Naveed Zafar M., Dutykh D., Sabatier P et al,** 2024, *Numerical Reconstruction of landslide Paleotsunami Using Geological Records in Alpine Lake Aiguebelette*, Journal of Geophysical Research, 129 – 5.
- **Nikolli A.,** 2020, *Tourisme et privatisation littorale : autour du privilège spatial de l'accès exclusif aux fronts d'eau. L'exemple des grands lacs périalpins savoyards (Annecy, Bourget, rive française du Léman)*, Mondes du Tourisme.
- **Nomade J., Chapron E., Desmet M., Reyss J.-L., Arnaud F., Lignier V.,** 2005, *Reconstructing historical seismicity from lake sediments (Lake Laffrey, Western Alps, France)*, Terra Nova, 17, pp. 350-357. ²
- **Rapuc W., Giguët-Covex C., Bouchez J., et al,** 2024, *Human-triggered magnification of erosion rates in European Alps since the Bronze Ag*, Nat Commun, pp.10.
- **Ritz J.F. et al.,** 2021, *New perspectives in studying active faults in metropolitan France : the « Active faults France » (FACT / ATS) research axis from the Resif-Epos consortium*, Comptes rendus Géosciences, Sciences de la planète, 353, pp.381-412.
- **Rougier H.,** 2000, *Les lacs d'origine volcanique (Volcanic origin lakes)*, Bulletin de l'Association de Géographes Français, 77-4, pp. 337-345.
- **Stebich M. et al,** 2005, *Vegetation History, Human Impact and Climate Change during the Last 700 Years Recorded in Annually Laminated Sediments of Lac Pavin, France*, Review of palaeobotany and palynology 133.1
- **Touchart L.,** 2000, *Essai de typologie des lacs alpins*, Bulletin de l'Association de géographes français, 77- 4, pp. 323 – 336.
- **Touchart L.,** 2003, *Les lacs, origine et morphologie*, L'information géographique, 67-4, pp. 383.

- **Wilhem B., Arnaud F., Sabatier P., Magand O., Chapron E., et al**, 2013, *Paleoflood activity and climate change over the last 1400 years recorded by lake sediments in the north-west European Alps*, Journal of Quaternary Science, 28 – 2, pp. 189-199.

Ouvrages :

- **Cojan I., Renard M.**, 2021, *Sédimentologie*, 3^{ème} édition, édition DUNOD.
- **Deconinck J.-F., Brigaud B., Pellenard P.**, 2016, *Péetrographie et environnements sédimentaires*, édition DUNOD.
- **Fort, M., Bétard, F. & Arnaud-Fassetta, G.**, 2015. Chapitre 1 - *Qu'est-ce que la géomorphologie : Évolution des idées et des concepts*. Géomorphologie dynamique et environnement, pp. 9-50. Paris: Armand Colin.
- **Gautier E., Touchart L.**, 1999, *Fleuves et lacs*, Synthèse Géographie.
- **Larras J.**, 1964, *Embouchures, estuaires, lagunes et deltas*, Paris : Eyrolle (Collection du Centre de recherches et d'essais de Chatou ; 11).
- **Renard M., Lagabrielle Y., Martin E., De Rafélis M.**, 2021, *Eléments de géologie*, 17^{ème}, édition DUNOD.
- **Rey, P.-J., & Dumont, A.**, 2015, *L'Homme et son environnement : des lacs, des montagnes et des rivières (1-)*. ARTEHIS Éditions.
- **Souriau A., Sylvander M.**, 2004, *Les séismes dans les Pyrénées*, édition Loubatières.

Thèses et mémoires :

- **Arricau V.**, 2019, *Apport de la géomatique à la compréhension des paléoenvironnements lacustres (Lac Pavin et lac de Loures-Barousse)*, Laboratoire GEODE, Université Toulouse Jean Jaurès.

- **Bamba Sarr. A.**, 2022, *Cartographies topo-bathymétriques détaillées de lacs naturels et artificiels : implication pour la gestion et le suivi des écosystèmes lacustres montagnards*, Laboratoire GEODE, Université Toulouse Jean Jaurès.
- **Baty M.**, 2024, *Dynamique du couvert végétal, de la diversité floristique et des activités pastorales de la vallée d'Oô (Haute-Garonne, France) au cours des 200 dernières années : études polliniques et micro-fossiles non polliniques*, Laboratoire GEODE, Université de Montpellier.
- **Chapron E.**, 1999, *Contrôles climatique et sismo-tectonique de la sédimentation lacustre dans l'Avant-Pays Alpin (Lac du Bourget) durant le Quaternaire récent*, Laboratoire de géodynamique des Chaînes Alpines, Université de Grenoble et Université Lille 1.
- **Lacan P.**, 2008, *Activité sismotectonique plio-quaternaire de l'Ouest des Pyrénées*, Laboratoire GEODE, Université de Pau et des pays de l'Adour.
- **Lacou A., Gissot C.**, 2021, *Evolution du risque d'inondation au village d'Oô face aux changements climatiques et anthropiques*, Laboratoire GEODE, Université Paul Sabatier – Toulouse.
- **Lacou A.**, 2021, *Caractérisation des changements environnementaux d'origine naturelle et anthropique des systèmes lacustres du bassin versant de la Garonne amont (Nord des Pyrénées) depuis les deux derniers millénaires*, Laboratoire GEODE, Université Paul Sabatier – Toulouse.
- **Larroque C., et al**, 2020, *Aux origines du séisme du Teil*, La Recherche, 561-562, pp.94-97.
- **Ledoux, G.**, 2010, *Séquence des événements des mouvements de masse Tardi-quaternaires dans le lac du Bourget, Nord-Ouest des Alpes françaises*, Faculté des études supérieures de l'Université Laval.
- **Lesaignoux A.**, 2006, *Modélisation et simulation de trains d'ondes LiDAR « vert » : application à la détection de faibles lames d'eau en rivière*, Rapport de stage de fin d'études
- **Lignier V.**, 2001, *Les sédiments lacustres et l'enregistrement de la paléosismicité : étude comparative de différents cas dans le Quaternaire des Alpes Nord-Occidentales et du Tien-Shan Kyrghyze*, Institut Polytechnique de Grenoble.
- **Mas V.**, 2009, *Caractérisation de l'activité hydrosédimentaire dans le Système turbiditique du Var (NO Méditerranée) et de son enregistrement dans l'archive sédimentaire*, Ecole doctorale des Sciences et Environnements, Université Bordeaux I

- **Montalban K.**, 2023, *Perception Lidar dans les environnements visuels dégradés : une approche probabiliste pour l'analyse de la dégradation et l'inférence de la visibilité*, Ecole doctorale aéronautique, Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace.
- **Rodriguez J.-F.**, 2012, *Paysages de l'hydroélectricité et développement touristique dans les Pyrénées*, Université de Bordeaux.

Sitographie :

- **Arjakovsky L., Carrière P.**, 2017, Universalis
URL : <https://www-universalis-edu-com.gorgone.univ-toulouse.fr/encyclopedie/lac-baikal/>
- **Atilio .**, 2023, *QGIS pour Lidar : modèle numérique de terrain (MNT) avec Cloud Compare*, Blog SIG & Territoires
URL : <https://www.sigterritoires.fr/index.php/qgis-pour-lidarmodele-numerique-de-terrain-mnt-avec-cloudcompare/>
- **Inconnu**, RGE ALTI, IGN (Institut National de l'Information géographique et forestière)
URL : <https://geoservices.ign.fr/rgealti>
- **Inconnu**, 2022, *Risque*, Géoconfluences
URL : <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/risque-s>
- **Inconnu**, 2021, *Littoral*, Géoconfluences
URL : <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/littoral>
- **Inconnu**, 2023, *Géomorphologie*, Géoconfluences
URL : <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/geomorphologie>

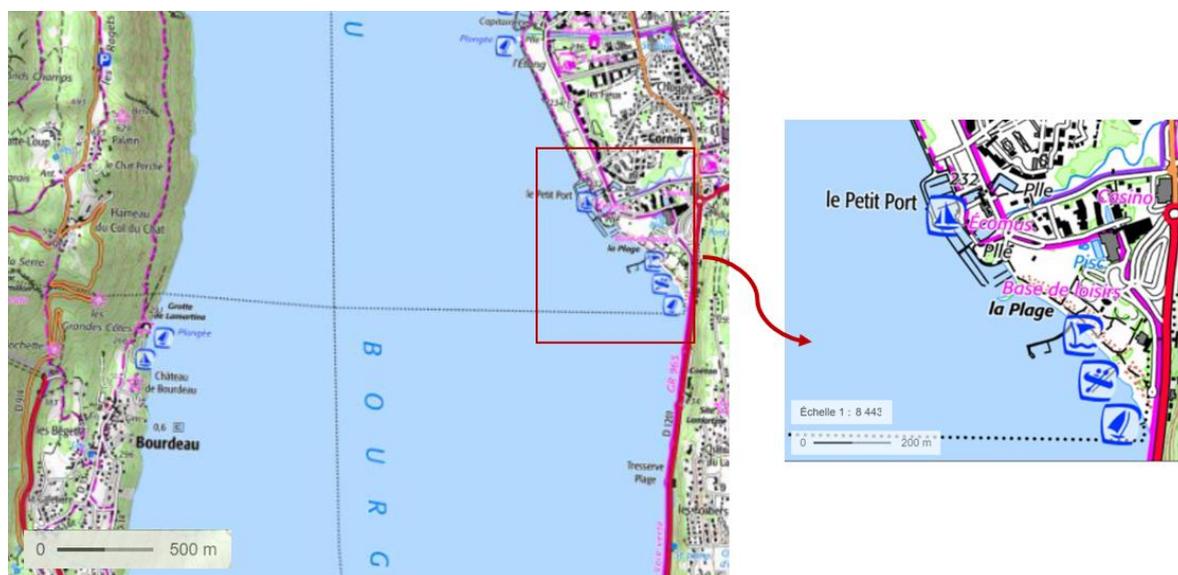
Autres :

- **Masson-Delmotte V., Gill S., Torr N., Roulette E.**, 2019, *Lacs, Reliefs*, 10.

Annexes

	Lac d'Oô	Lac d'Espingo	Lac Saussat	Lac d'Issarlès	Lac du Bourget
PAACT	x	x	x		
FACT	x	x	x	x	x
ZA PYGAR	x	x	x		
ARCHISS 1 & 2				x	

Annexe 1 : Tableau récapitulatif des missions



Annexe 2 : aménagements littoral du Bourget, Source : IGN



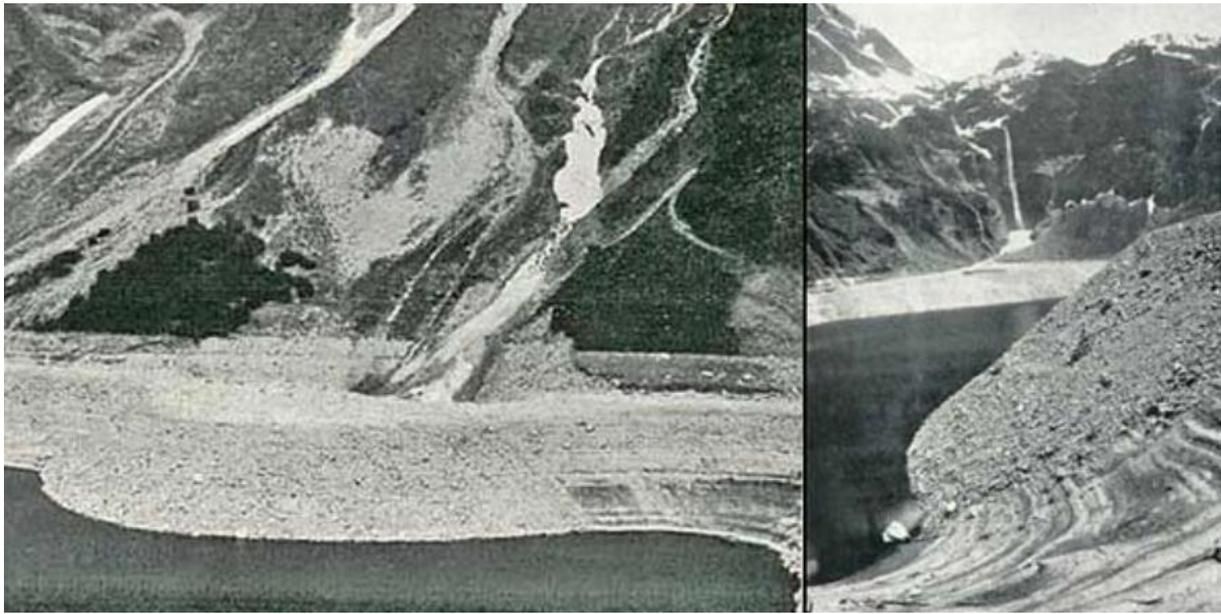
Annexe 3 : schéma aménagement global du lac d'Issarlès et ses environs, source : EDF



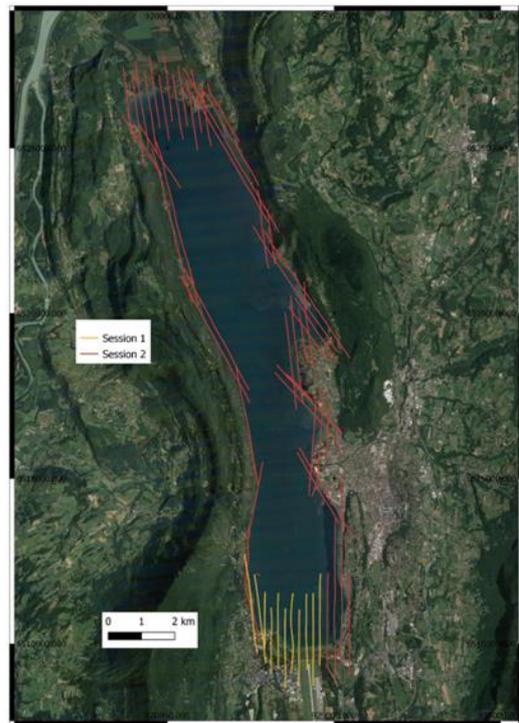
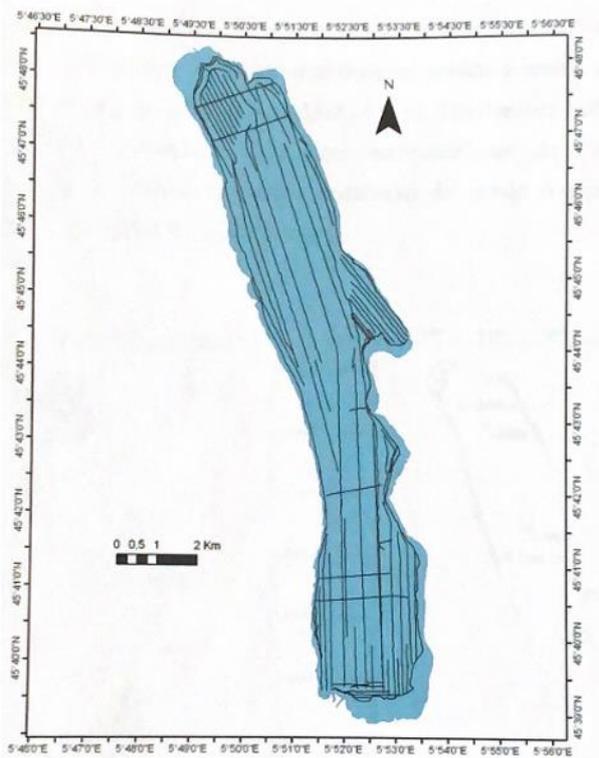
Annexe 4 : : marnage lac d'Issarlès, source : <http://nonololoaly.unblog.fr/2014/03/02/le-lac-dissarles/>



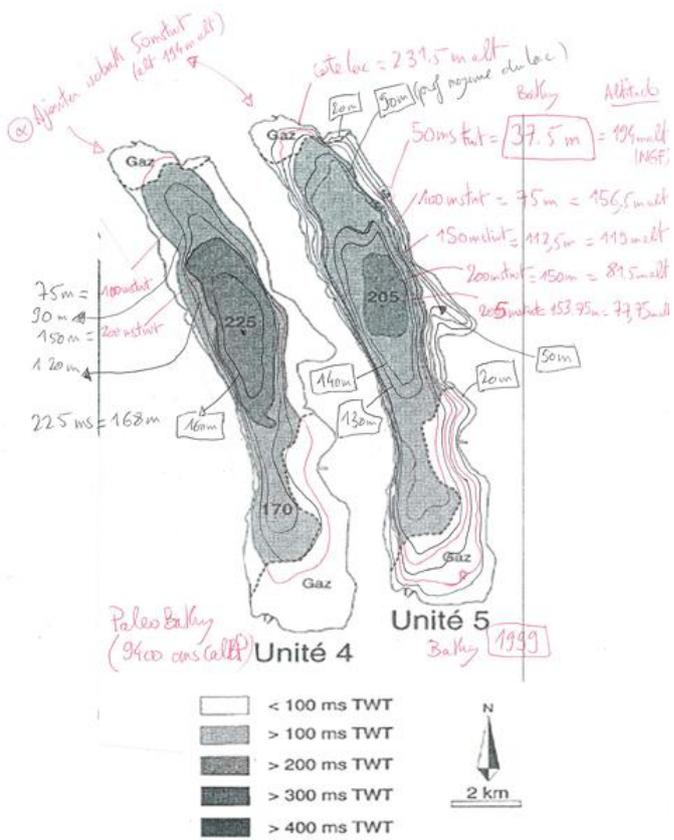
Annexe 5 : cônes de déjection du lac d'Oô, source : A. Zambelli



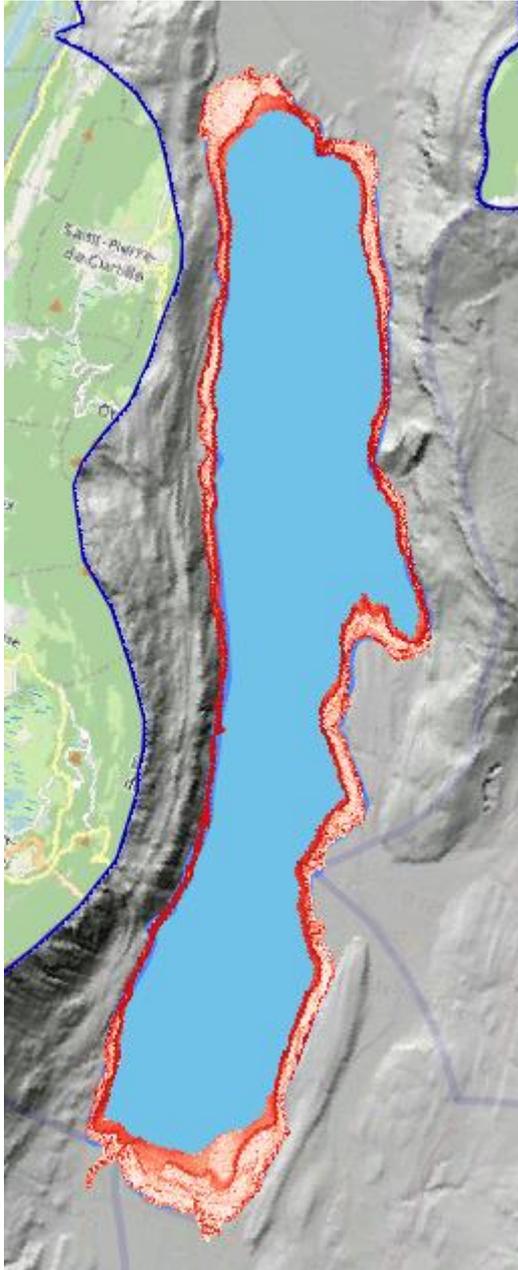
Annexe 6 : marnage important au lac d'Oo, L. Gaurier, 1919



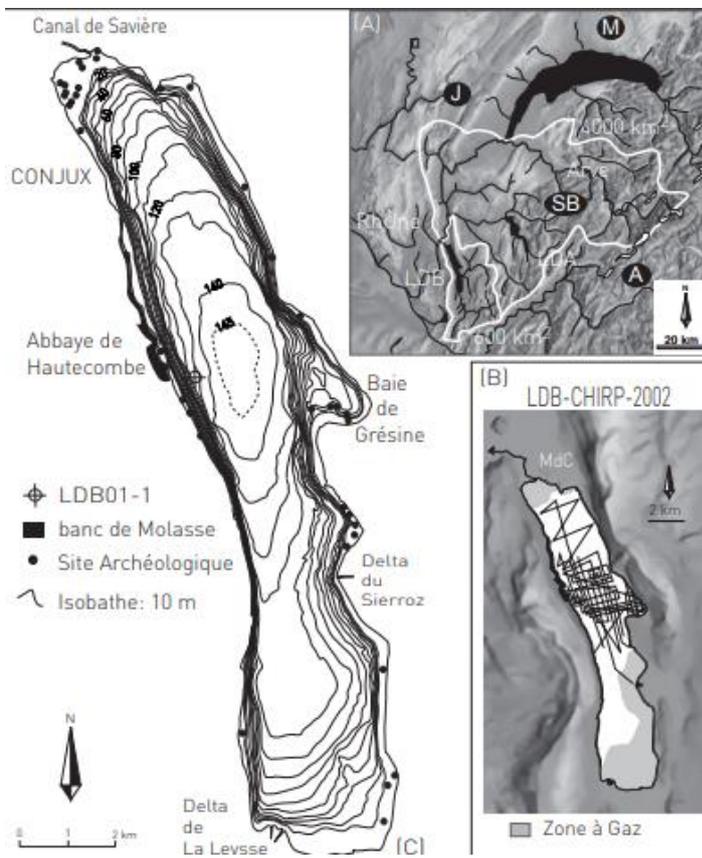
Annexe 7 : lignes de levée multifaisceaux campagne de 2008 (à gauche) / plan de vol du drone de GeoFit Expert pour l'acquisition de données Lidar par le CEN en 2021 sur le littoral du lac du Bourget, type de Lidar = Optech TITAN (à droite)



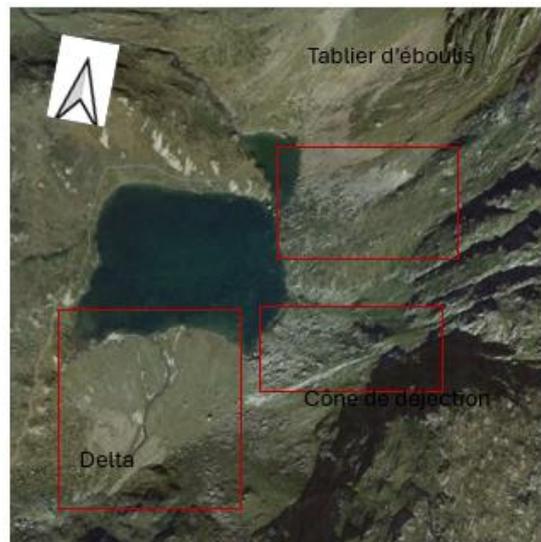
Annexe 8 : Cartes bathymétriques, Unit 4 (paleo bathy) et Unit 5 , source : E. Chapron 1999



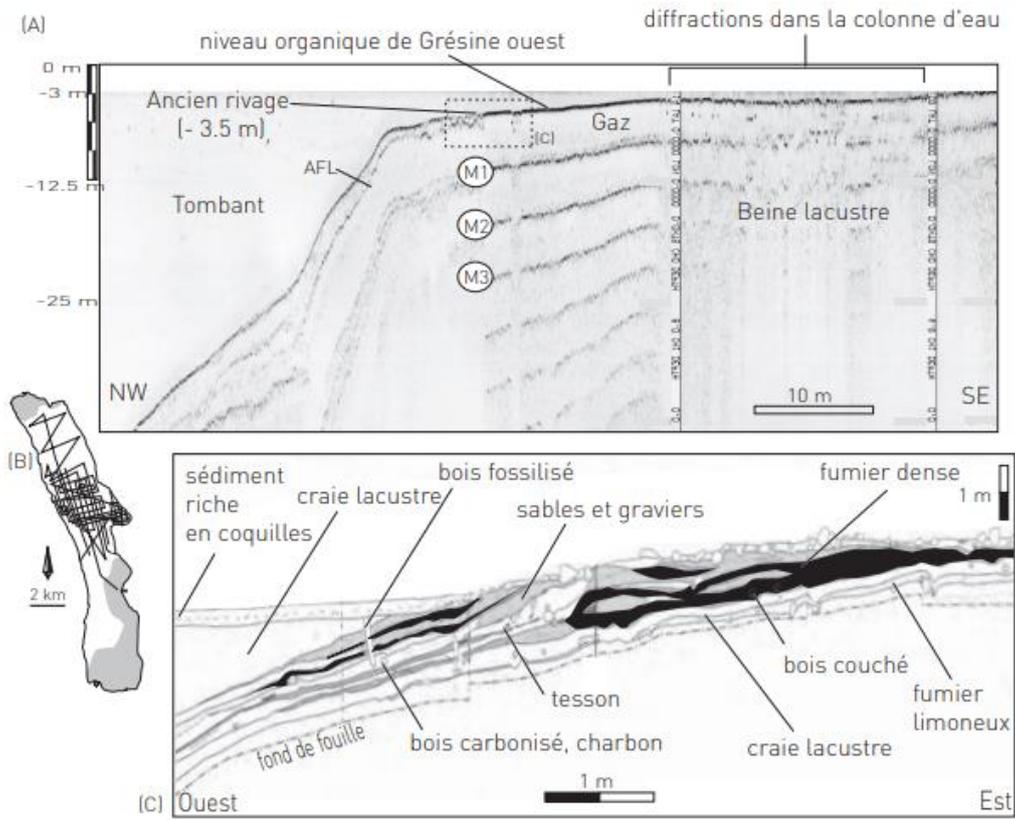
Annexe 9 : Pentes littoral du Bourget à partir des données Lidar Vert



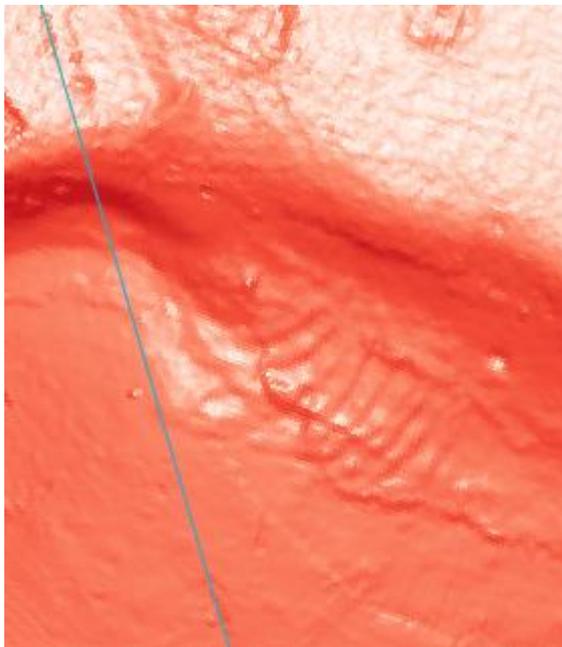
Annexe 10 : Archéologie - grille sismique Bourget, Chapron, Billaud, 2007



Annexe 11 : point de vue Google Earth lacs de la Neste d'Oo (à gauche) et lac de Saussat (à droite)



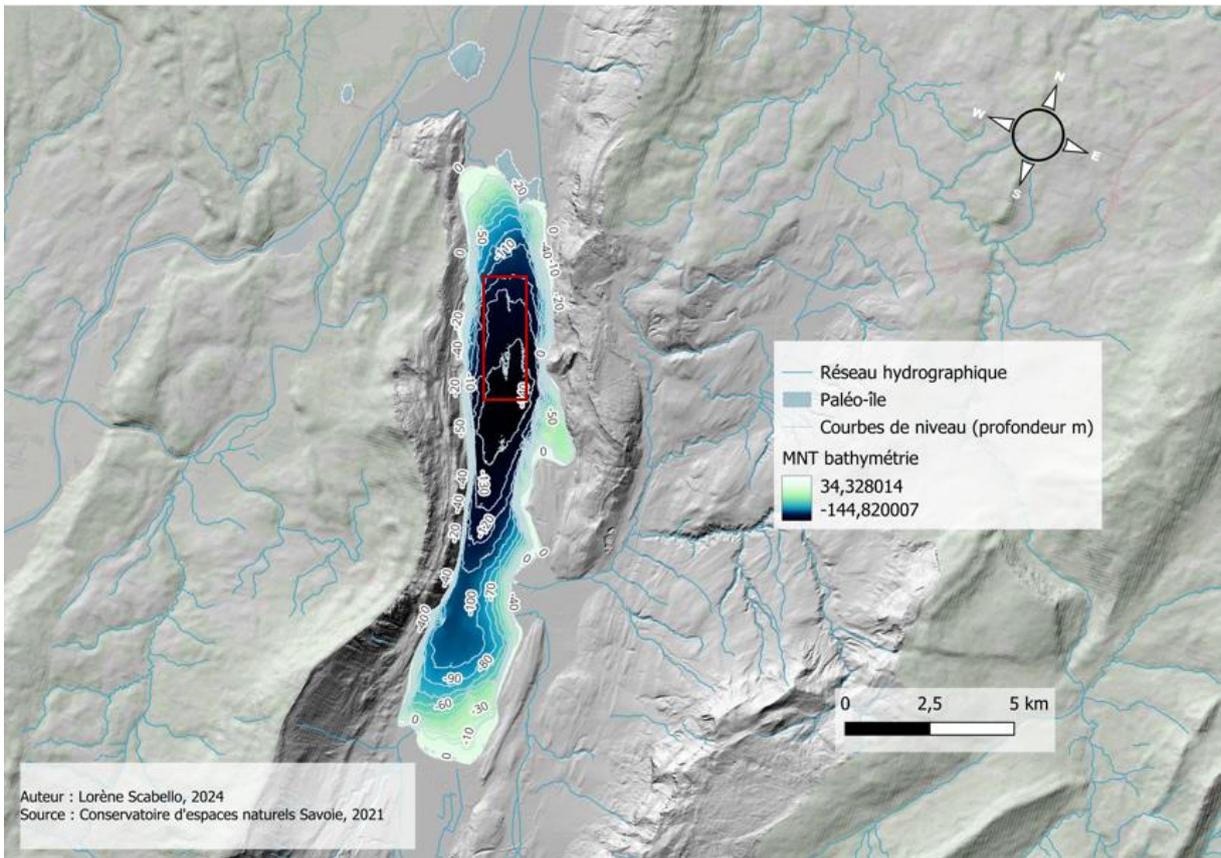
Annexe 12 : profil sismique beine littorale, E. Chapron 2007



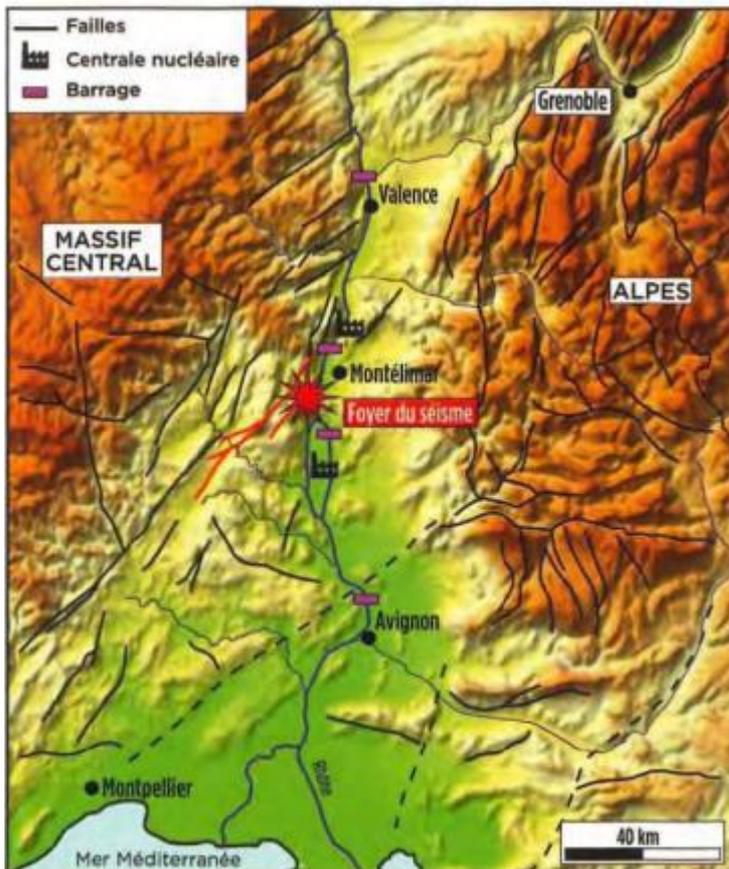
Annexe 13 : dépôts de crue du Rhône, source : Lorène Scabello 2024, Lidar Vert



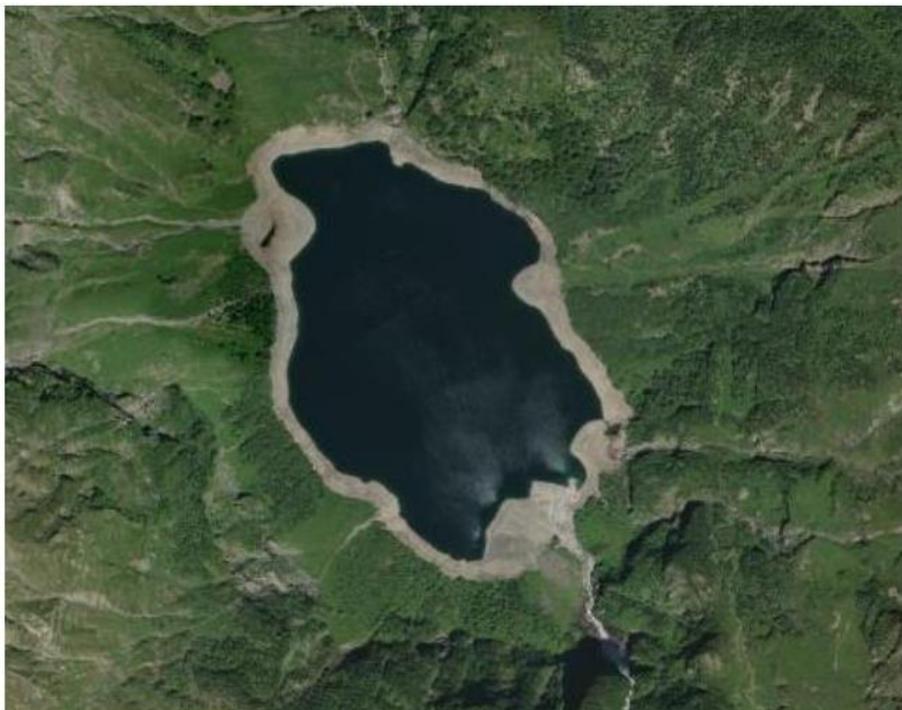
Annexe 14 : cours du Sierroz dévié, source : Lorène Scabello 2024, Lidar vert



Annexe 15 : Anomalie interpolation encadrée en rouge



Annexe 16: foyer du séisme du Teil de 2019

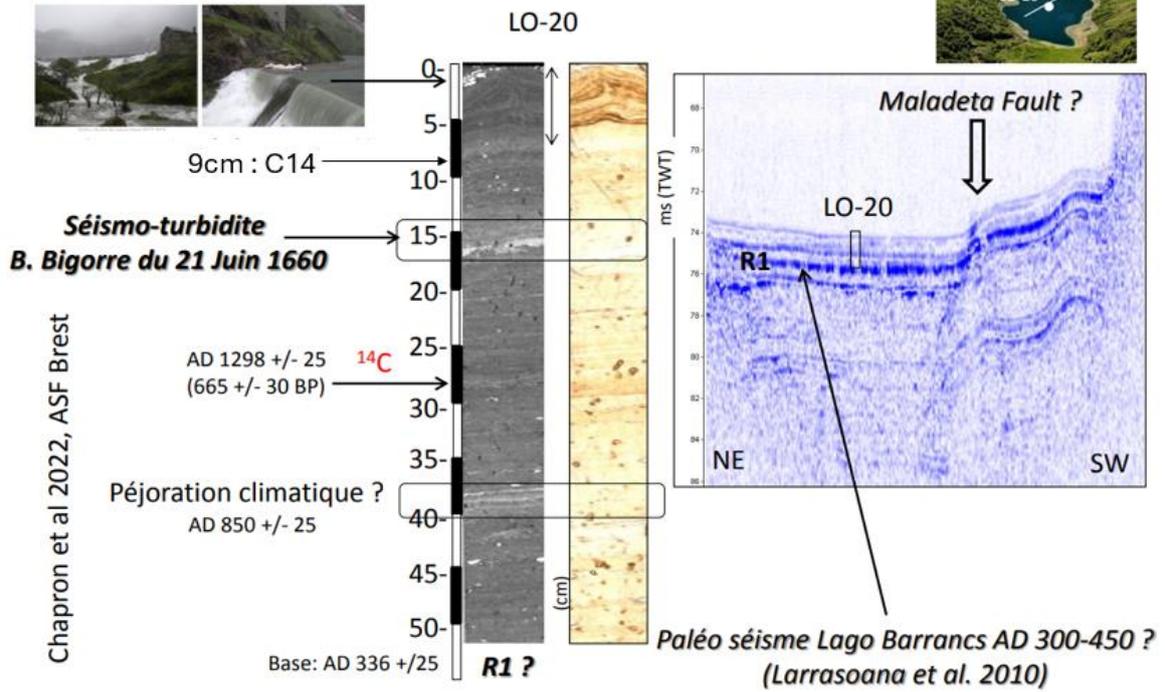


Annexe 17 : lac d'Oô abaissé, source : Google Earth

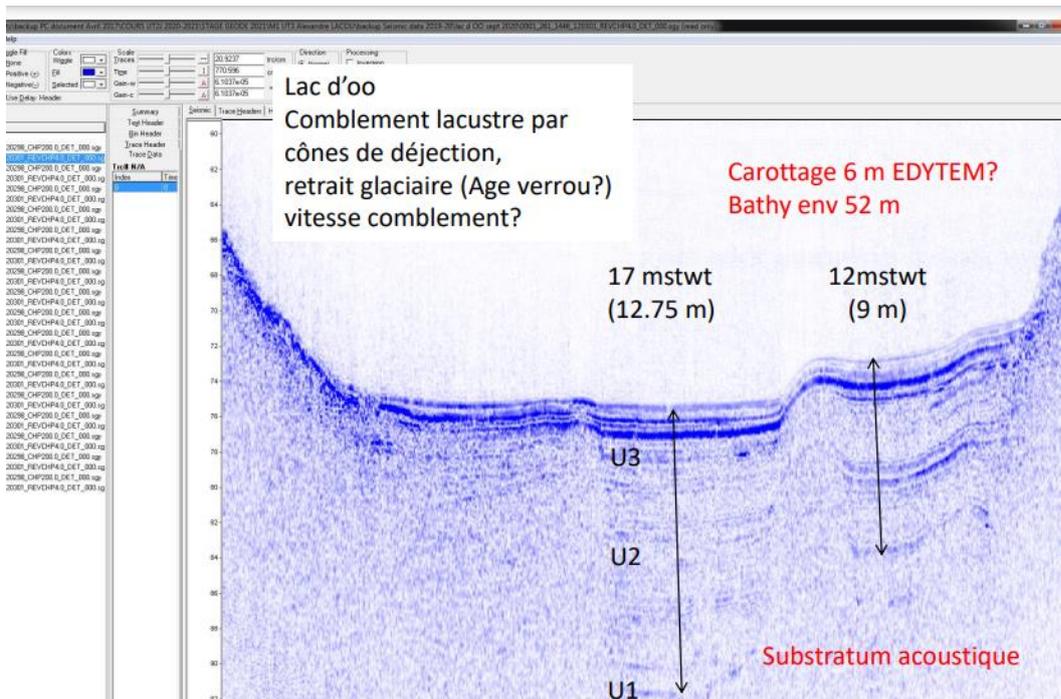
1700 ans d'archives du lac d'Oo



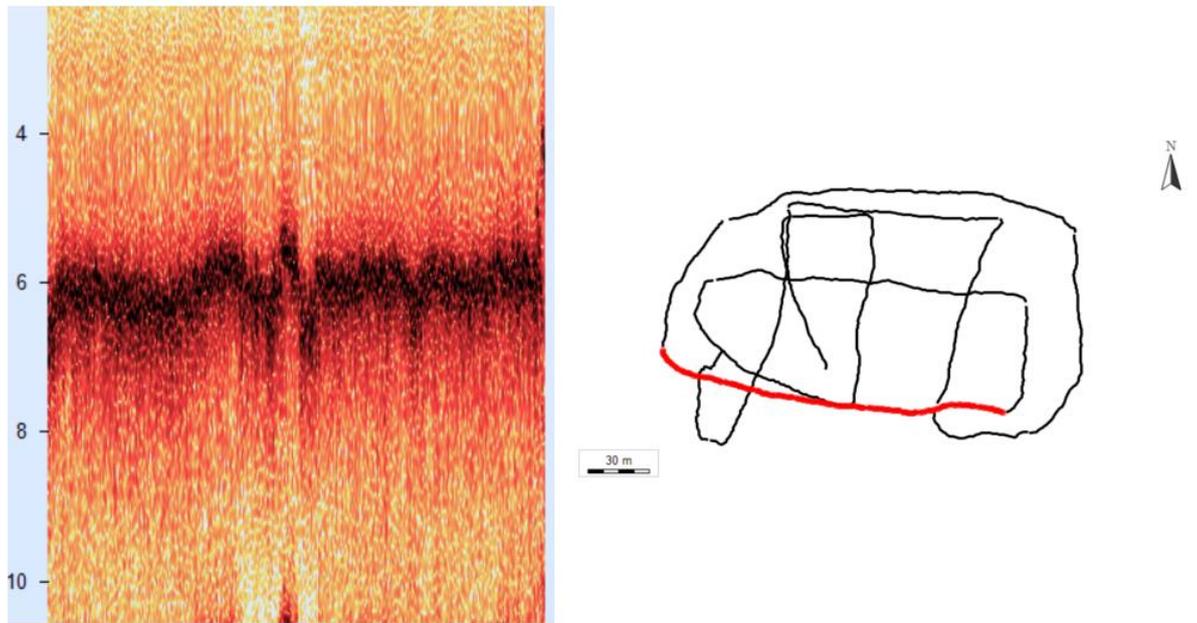
Débordement du lac-réservoir Juin 2013



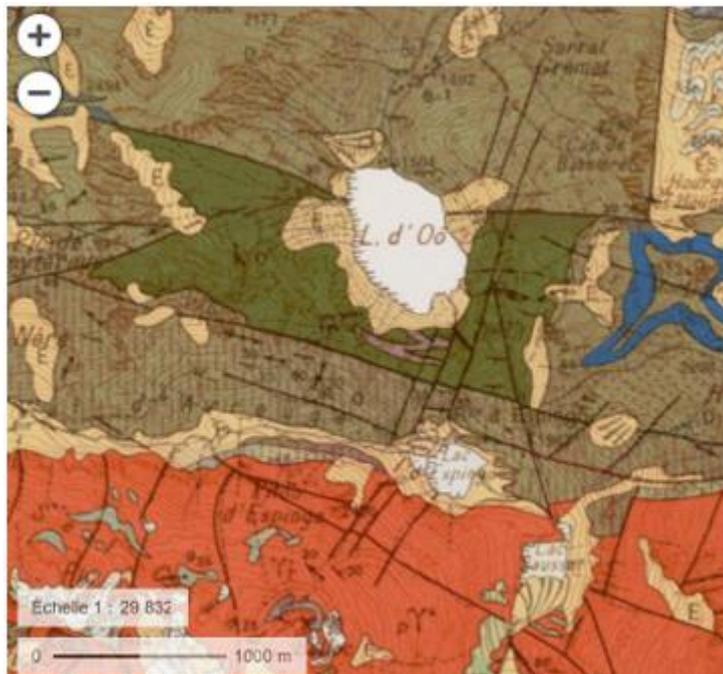
Annexe 18 : carotte sédimentaire lac d'Oo et strates sédimentaires, source : E. Chapron



Annexe 19 : : profil sismique proximité cascade lac d'Oô, source : E. Chapron



Annexe 20 : profil sismique Saussat à l'exutoire de la Neste d'Oô, E. Chapron 2022



Annexe 21 : Géologie lacs de la Neste d'Oô, source : Géoportail

Index des figures

Figure 1: organigramme du laboratoire GEODE, source : UT2J.....	11
Figure 2 : lac étudiés / 1 : Lac du Bourget - Jura / 2 : Lac d'Issarlès - Massif Central / 3 : Lacs des Pyrénées : Lacs en cascade de la Neste d'Oo ; Lac d'Oo; Lac d'Espingo; Lac Saussat et Lac Vert de la vallée du Lys	14
Figure 3: Contexte global du lac du Bourget	15
Figure 4 : Carte bathymétrique du lac d'Issarlès réalisée par André Delebecque en 1898 (à gauche) et carte IGN du lac (à droite)	17
Figure 5 : carte topographique de la localisation des lacs en cascade de la Neste d'Oô, projection Lambert II, 500m, source : IGN.....	18
Figure 6:MNT bassin versant de la Neste d'Oô et ses lacs	19
Figure 7 : carte bathymétrique de Ludovic Gaurier, 1919, d'après un levé de Belloc de 189620	
Figure 8 : schéma de la morphologie d'un delta, source : https://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours-sed/sed-10.htm	23
Figure 9: : schéma organisation d'un cône de déjection, source : Adobe Stock.....	24
Figure 10 : schéma d'une campagne de bathymétrie multifaisceaux, source : Ifremer.....	27
Figure 11: exemple d'un profil sismique Issarlès et localisation de la navigation de 2019 sur le logiciel EdifisSegy (4kHz)	32
Figure 12 : carte géomorphologique du lac du Bourget.....	35
Figure 13 : Carte géomorphologique du lac d'Issarlès, et hypothétiques zones pouvant expliquer les glissements (H1 ; H2 ; H3)	38
Figure 14 : Grille de navigation des différentes campagnes pour la sismique réflexion	39
Figure 15 : carte topo-bathymétrique et géomorphologique des lacs en cascade de la Neste d'Oo	40
Figure 16 : carte géomorphologique et topo-bathymétrique du lac d'Oô.....	41
Figure 17 : carte topo-bathymétrique et géomorphologique du lac d'Espingo	43
Figure 18 : profil sismique lac d'Espingo, 200kHz	44
Figure 19 : carte topo-bathymétrique et géomorphologique du lac de Saussat.....	45
Figure 20 : carotte LS22-2 et son schéma + valeurs XRF du calcium Calcium - Ca	46

Index des annexes

Annexe 1 : Tableau récapitulatif des missions	57
Annexe 2 : aménagements littoral du Bourget, Source : IGN.....	57
Annexe 3 : schéma aménagement global du lac d'Issarlès et ses environs, source : EDF.....	58

Annexe 4 : : marnage lac d'Issarlès, source : http://nonololoaly.unblog.fr/2014/03/02/le-lac-dissarles/	59
Annexe 5 : cônes de déjection du lac d'Oô, source : A. Zambelli	59
Annexe 6 : marnage important au lac d'Oo, L. Gaurier, 1919	60
Annexe 7 : lignes de levée multifaisceaux campagne de 2008 (à gauche) / plan de vol du drone de GeoFit Expert pour l'acquisition de données Lidar par le CEN en 2021 sur le littoral du lac du Bourget, type de Lidar = Optech TITAN (à droite)	60
Annexe 8 : Cartes bathymétriques, Unit 4 (paleo bathy) et Unit 5 , source : E. Chapron 1999	61
Annexe 9 : Pentas littoral du Bourget à partir des données Lidar Vert	62
Annexe 10 : Archéologie - grille sismique Bourget, Chapron, Billaud, 2007	63
Annexe 11 : point de vue Google Earth lacs de la Neste d'Oo (à gauche) et lac de Saussat (à droite)	63
Annexe 12 : profil sismique beine littorale, E. Chapron 2007	64
Annexe 13 : dépôts de crue du Rhône, source : Lorène Scabello 2024, Lidar Vert	64
Annexe 14 : cours du Sierroz dévié, source : Lorène Scabello 2024, Lidar vert	65
Annexe 15 : Anomalie interpolation encadrée en rouge	65
Annexe 16: foyer du séisme du Teil de 2019	66
Annexe 17 : lac d'Oô abaissé, source : Google Earth	66
Annexe 18 : carotte sédimentaire lac d'Oo et strates sédimentaires, source : E. Chapron	67
Annexe 19 : : profil sismique proximité cascade lac d'Oô, source : E. Chapron	67
Annexe 20 : profil sismique Saussat à l'exutoire de la Neste d'Oô, E. Chapron 2022	68
Annexe 21 : Géologie lacs de la Neste d'Oô, source : Géoportail	68

Table des matières

Introduction	7
I) Contexte du stage	10
1) Présentation du laboratoire : GEODE	10
2) Présentation des missions	11
3) Présentation des zones d'étude : contexte géographique, géologique et anthropique..	14
II) Cadre théorique	21
1) Etat de l'art : les environnements lacustres et leurs littoraux	21
La limnologie	21
Typologie des lacs	21
La géomorphologie des littoraux lacustres	22
Les aléas et risques en zones lacustres	25
L'anthropisation des lacs : usages et installations	Erreur ! Signet non défini.
2) Etat de l'art : les technologies utilisées	26
III) Cadre méthodologique	28
1) Collecte des données et traitement des données	28
Collecte des données	28
Sédimentologie : carottage, échantillonnage, et datation	28
2) Méthodologie de la cartographie topo-bathymétrique et géomorphologique des lacs.	30
Les logiciels utilisés	30
Création des Modèles Numériques de Terrain : les cartes topo-bathymétriques des lacs et les MNT des bassins versants	30
Création des cartes géomorphologiques des environnements lacustres	33
IV) Résultats	34
1) Le lac du Bourget : un grand lac de vallée glaciaire, et son paléoenvironnement	34
2) Le lac de maar d'Issarlès : un système lacustre alimenté par des cours d'eau torrentiels	37
3) Les lacs pro-glaciaires de la Neste d'Oô : lac d'Oô, lac d'Espingo et lac Saussat	40
V) Discussion	47
1) Critiques et perspectives	47
2) Retour d'expérience	48
3) Liens avec le master	49
Conclusion	49
Bibliographie	51

Annexes	57
Index des figures	69
Index des annexes.....	69

Résumé / Abstract

Les lacs sont de véritables archives environnementales. Issus de divers processus hydrologiques, géologiques et géomorphologiques, les systèmes lacustres s'insèrent dans la compréhension de l'évolution environnementale du local au global. Qu'importe le type de lac, les dynamiques littorales sont quant à elles diverses et variées, et dépendent avant tout du milieu dans lequel ils se trouvent (contexte géologique, géographique, géomorphologique anthropique). Ainsi, l'étude des formations géomorphologiques littorales est un pan à part entière, entre milieu terrestre et milieu aquatique. La cartographie de ces zones se révèle être une façon pour mieux les appréhender, et prendre du recul. Ainsi, à l'aide de multiples technologies tels que le lidar, les sondeurs multifaisceaux, la sismique réflexion, ou encore des images satellites et photos aériennes, notre travail durant ce stage s'est attaché à cartographier 5 lacs français, d'origine et de taille différentes.

Nous avons les trois petits lacs proglaciaires de la Neste d'Oô, le lac d'Oô, le lac d'Espingo et le lac Saussat, situés dans un fort contexte montagnard dans les Pyrénées ; le lac d'Issarlès qui est un lac de maar, donc volcanique dans le Massif central, et enfin le grand lac de vallée glaciaire aux pieds des Alpes, le lac du Bourget.

Réalisé au sein du laboratoire de GEODE (Géographie de l'environnement) à Toulouse, ce stage s'est centré sur l'étude de ces 5 lacs, eux-mêmes intégrés dans des projets de recherches variés (FACT, PAACTE, ZA PYGAR...), reliant des laboratoires de recherche éparpillés dans toute la France, nous avons étudié leurs systèmes géomorphologiques hétérogènes, et nous avons pu explorer le volet sédimentologique en reliant nos questionnements à la notion des risques et aléas naturels et / ou anthropiques. En effet, étant donné que les lacs sont de véritables archives environnementales, les événements y sont enregistrés. Mis en lien avec d'autres données historiques, nous pouvons ainsi retracer l'histoire des lacs et plus largement de leur bassin versant.

L'étude par la cartographie géomorphologique des lacs et de leurs littoraux s'est accompagnée d'une remobilisation de bases de données préexistantes, qui ont pu être étayées et complétées. Suivant des méthodes spécifiques selon les données et l'objectif à atteindre, nous avons détaillé nos cheminements et limites de travaux.

Mots-clé : géomorphologie, lacs, littoraux, cartographie, sédimentologie

Lakes are areas of real environmental records. Resulting from various hydrological, geological and geomorphological processes, lake systems are part of the understanding of environmental evolution from local to global. Regardless of the type of lake, shoreline dynamics are diverse and varied, and depend above all on the environment in which they are located (geological, geographical, anthropogenic geomorphological context). Thus, the study of coastal geomorphological formations is a full part, between terrestrial and aquatic environment. The mapping of these areas is a way to better understand them, and to take a step back. Thus, using multiple technologies such as lidar, multibeam sounders, reflection seismic, satellite images and aerial photos, our work during this internship focused on

mapping the lakeshore of 5 French lakes, of different origin and size. We have the three small proglacial lakes of Neste d'Oô, Lake d'Oô, Lake Espingo and Lake Saussat, located in a strong mountain context in the Pyrenees; Lake Issarlès which is a maar lake, therefore volcanic in the Massif Central, and finally the large glacial valley lake at the foot of the Alps, Lake Bourget.

Realized in the laboratory of GEODE (Environmental Geography) in Toulouse, this internship focused on the study of these 5 lakes, themselves integrated in various research projects (FACT, PAACTE, ZA PYGAR...), connecting research laboratories scattered throughout France, we studied their heterogeneous coastlines, and we were able to explore the sedimentological component by linking our questions to the notion of natural and/ or anthropogenic risks and hazards. Indeed, since the lakes are real environmental archives, events are recorded there. Linked to other historical data, we can trace the history of the lakes and more broadly their watershed.

The beginning of the study by geomorphological mapping of lakes and their coastlines was accompanied by a remobilization of pre-existing databases, which could be supported and completed. Following specific methods according to the data and the objective to be achieved, we detailed our work paths and limits.

Keywords: geomorphology, lakes, coastlines, cartography, sedimentology