

# Validation d'un processus de captation des données bathymétriques et sédimentologiques par drone marin pour l'analyse 3D de l'épaisseur de sédiments

*Domaine : Activité extractive de matériaux en eau (gravière / sablière)*

Rapport réalisé par : Hermann Zouzou  
En date du : 11-09-2017

Encadrement :



Financement :



## Table des matières

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>5</b>
<b>I. LE GRANULAT</b> .....	<b>5</b>
1. La consommation de granulats en France .....	6
1. Les types de gisements .....	7
2. Les modes d'extraction .....	9
3. Le réaménagement des sites d'extraction .....	11
<b>II. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE</b> .....	<b>14</b>
1. Analyse environnementale .....	14
2. Prestations topographiques .....	15
3. Prestations bathymétriques .....	15
<b>III. ETAT DE L'ART</b> .....	<b>16</b>
1. Mise en place des gisements alluvionnaires .....	16
a) <i>Les paléolacs glaciaires</i> .....	16
b) <i>Les terrasses fluviales</i> .....	20
2. la géophysique dans le domaine des granulats .....	23
a) <i>la campagne d'exploration</i> .....	23
a) <i>La cartographie acoustique</i> .....	27
<b>IV. CADRE GENREAL DES SITES D'ETUDES</b> .....	<b>29</b>
1. PIEDMONT DES PYRENEES FRANÇAISES .....	30
a) <i>Lac-gravière de Loures-Barousse</i> .....	30
b) <i>Carrière de Miramont-de-Comminges</i> .....	31
c) <i>Le lac de la Ramée</i> .....	31
2. Le sillon alpin : le site d'exploitation de Froges .....	32
<b>V. Les méthodologies</b> .....	<b>33</b>
1. la sismique réflexion .....	33
2. le géoradar, .....	35
<b>VI. RESULTATS ET DISCUSSION</b> .....	<b>36</b>
1. <b>RESULTATS</b> .....	36
a) <i>Le sillon alpin</i> .....	36
b) <i>Le Piedmont des Pyrénées</i> .....	38
<b>VII. DISCUSSION</b> .....	<b>47</b>
1. Les méthodes géophysiques et la granulométrie des sédiments .....	47
a) <i>La sismique réflexion et la granulométrie des sédiments</i> .....	47
b) <i>L'utilisation du géo-radar en milieu aquatique</i> .....	48
c) <i>La comparaison entre ces deux méthodes : sismique réflexion et géoradar</i> .....	48
2. Le projet de recherche de GEOFALCO .....	48
3. La dynamique sédimentaire post-exploitation .....	49

<u>Figure 1</u> : Evolution de l'utilisation de granulats en millions de tonnes.....	6
<u>Figure 2</u> : Evolution de la production totale de granulats en France métropolitaine .....	6
<u>Figure 3</u> : évolution de la production de granulats par région en 2011 ( <i>Source: Unicem, 2011</i> ).....	7
<u>Figure 4</u> : Répartition des gisements de granulats en fonction de leur localisation et leur origine géologique ( <i>Source : Unicem, 2003</i> ).....	9
<u>Figure 5</u> : A-une chargeuse; B- une pelle hydraulique et en arrière plan un Dumper ( <i>Source : Vicat</i> ) .....	10
<u>Figure 6</u> : Extraction avec une dragueline ( <i>source : Vicat</i> ).....	10
<u>Figure 7</u> : extraction avec une drague à godet ( <i>source : Vicat</i> ).....	11
<u>Figure 8</u> : répartition des anciennes gravières réaménagées en zone protégée dans le sud de Toulouse (..).....	13
<u>Figure 9</u> : Analyse environnementale d'un cours d'eau.....	14
<u>Figure 10</u> : A droite, modélisation en 3 dimensions d'une carrière. A gauche, plan d'exploitation de la carrière .....	15
<u>Figure 11</u> : A- plan d'eau; B- carte bathymétrique réalisée avec un drone catamaran.....	16
<u>Figure 12</u> : Dynamique des glaciers, exemple de la chaîne Alpine ( <i>source : <a href="http://tp-svt.pagesperso-orange.fr/glaces.htm">http://tp-svt.pagesperso-orange.fr/glaces.htm</a></i> ).....	17
<u>Figure 13</u> : profil transversal de la distribution sédimentaire suite à un retrait de glacier ( <i><a href="https://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours-sed/sed-5.htm">https://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours-sed/sed-5.htm</a></i> ).....	17
<u>Figure 14</u> : l'extension glaciaire dans le nord pyrénéenne avec les vallées de la Garonne, l'Ariège, l'Ossau et du Gave de Pau. ( <i>Perrouy et al., 2015</i> ).....	18
<u>Figure 15</u> : A- Glacier de l'Isère lors du dernier maximum glaciaire; B- Formation du lac du Grésivaudan suite au retrait du glacier de l'Isère.....	19
<u>Figure 16</u> : séquence sédimentaire dans le paléolac du Grésivaudan avec le forage GMB1 de Domène. ....	19
<u>Figure 17</u> : A- Rapport charge/débit élevé: sédimentation importante; B- Rapport charge/ débit faible: surcreusement du lit .....	20
<u>Figure 18</u> : sédimentation d'une rivière à méandre .....	21
<u>Figure 19</u> : Carte géologique du Nord-Pyrénéen et localisation des terrasses fluviales de la Garonne ( <i>Christophoul et al., 2014</i> ) .....	22
<u>Figure 20</u> : appareil de mesure géo-electrique portable 16GL-N de l'entreprise PAST ( <i><a href="http://www.directindustry.fr/prod/pasi/product-57451-375485.html">http://www.directindustry.fr/prod/pasi/product-57451-375485.html</a></i> ).....	23
<u>Figure 21</u> : les différents dispositifs des électrodes ( <i><a href="http://www.directindustry.fr/prod/pasi/product-57451-375485.html">http://www.directindustry.fr/prod/pasi/product-57451-375485.html</a></i> ).....	24
<u>Figure 22</u> : illustration du sondage électrique avec les dispositifs de Schlumberger et de méthode inverse ( <i><a href="http://junon.u-3mrs.fr/ms422aww/webdocs/mst/electriques/electriques.html">http://junon.u-3mrs.fr/ms422aww/webdocs/mst/electriques/electriques.html</a></i> ). ..	24
<u>Figure 23</u> : Illustration de la trainée électrique ( <i><a href="http://water-survey.net/meth_electrique.php">http://water-survey.net/meth_electrique.php</a></i> ) ..	25
<u>Figure 24</u> : Exemple d'un profil de résistivité ( <i><a href="http://slideplayer.fr/slide/466244/">http://slideplayer.fr/slide/466244/</a></i> ) .....	25
<u>Figure 25</u> : A- principe de la sismique réfraction ( <i><a href="http://www.ucltomars.org/Expe-5.html">http://www.ucltomars.org/Expe-5.html</a></i> ) ; B- dispositif de la sismique réfraction ( <i><a href="http://www.gexplore.fr/fr/la-sismique-refraction/">http://www.gexplore.fr/fr/la-sismique-refraction/</a></i> ) ....	26
<u>Figure 26</u> : Exemple d'un profil sismique 2D obtenu par tomographie sismique ( <i><a href="http://www.geolithe.fr/sismique-refraction/">http://www.geolithe.fr/sismique-refraction/</a></i> ).....	27
<u>Figure 28</u> : les fréquences et leur domaine d'utilisation. ( <i><a href="http://flotte.ifremer.fr/content/download/5143/114665/version/1/file/3_intechmer_mon_ofaisceau.pdf">http://flotte.ifremer.fr/content/download/5143/114665/version/1/file/3_intechmer_mon_ofaisceau.pdf</a></i> ).....	29
<u>Figure 29</u> : principe d'un sondeur multifaisceau ( <i><a href="http://flotte.ifremer.fr/content/download/5143/114665/version/1/file/3_intechmer_mon_ofaisceau.pdf">http://flotte.ifremer.fr/content/download/5143/114665/version/1/file/3_intechmer_mon_ofaisceau.pdf</a></i> ).....	29
<u>Figure 31</u> : Localisation du lac de Miramont-de-Comminges .....	31
<u>Figure 32</u> : Localisation du lac de la Ramée (Google Earth).....	32
<u>Figure 33</u> : Localisation de la carrière de Champs-près-Froges. ....	33

<u>Figure 34</u> : (A) Principe de la cartographie réflexion de type Chirp (Chapron et al., 2007) ; B- profil sismique d'une séquence sédimentaire du lac d'Orédon lors de mon stage de 2016 à Geode	34
<u>Figure 35</u> : profil sismique d'une séquence sédimentaire du lac d'Orédon étudié lors de mon stage 2016 et interprété avec EDIFI-SEDY.....	35
<u>Figure 36</u> : profil axial du lac.....	36
<u>Figure 37</u> : profil axial interprété .....	37
<u>Figure 38</u> : Carte bathymétrique générée sur GlobalMapper .....	37
<u>Figure 39</u> : carte bathymétrique 3D générée sur GlobalMapper.....	40
<u>Figure 40</u> : profil axial du lac de Loures-Barousse.....	40
<u>Figure 44</u> : profil sismique 14kHz axial.....	45
<u>Figure 45</u> : carte bathymétrique réalisée sur Global Mapper.....	45
<u>Figure 46</u> : section radar ligne 16 (100 Mhz blindées) .....	47
<u>Figure 47</u> : profils 14 sens Nors Sud.....	47

<u>Tableau 1</u> : Granulométrie des granulats, (Source : infociment.fr) .....	5
<u>Tableau 2</u> : Différents types de réaménagements ( <i>source : unpg</i> ).....	12
<u>Tableau 3</u> : Les fréquences et les zones d'étude .....	28

## INTRODUCTION

Les granulats représentent la deuxième matière première après l'eau au monde. En France, cette ressource a connu une forte évolution depuis 2010. Environ 379 millions de tonnes de granulats ont été extraites en 2011 (UNICEM). Cette croissance et forte demande due à leur importance dans la construction oblige les entreprises d'extraction à redoubler d'efforts pour répondre aux exigences du marché. Les modes d'extraction des gisements ont été améliorés pour permettre une optimisation de la ressource. En revanche, il est difficile pour ces entreprises d'effectuer un suivi précis de l'évolution de cette extraction.

GEOFALCO est un bureau d'étude spécialisé dans la topographie et l'estimation des épaisseurs pour les sites de carrières. Pour répondre à cette problématique de suivi d'extraction, il se propose d'établir un protocole permettant un suivi des gisements lors de l'extraction en eau.

Ce rapport de stage sera subdivisé en 3 parties :

- La première partie situera l'importance de la matière granulat dans l'économie
- La deuxième partie plus scientifique expliquera la mise en place de ces gisements
- La troisième partie présentera les campagnes de test menées et les résultats obtenus.

## I. LE GRANULAT

Les granulats sont des matériaux alluvionnaires de taille inférieure à 125mm qui servent pour la construction des ouvrages de travaux publics, de génie civil et de bâtiment (*UNPG, 2011*). Ils sont soit utilisés directement dans la construction de routes, voies ferrées, terrains d'atterrissages ou associés pour fabriquer des produits de construction tels que le béton, les mortiers et les enrobés. La principale caractéristique du granulat est sa taille. Elle ne correspond pas à une taille exacte mais à un intervalle défini compris entre le plus petit diamètre **d** et le plus gros diamètre **D**. cet intervalle d/D est appelé **classe granulaire**.

On distingue sept familles de granulats en fonction de la classe granulaire mais les familles les plus utilisées sont les suivantes (*Tableau 1*).

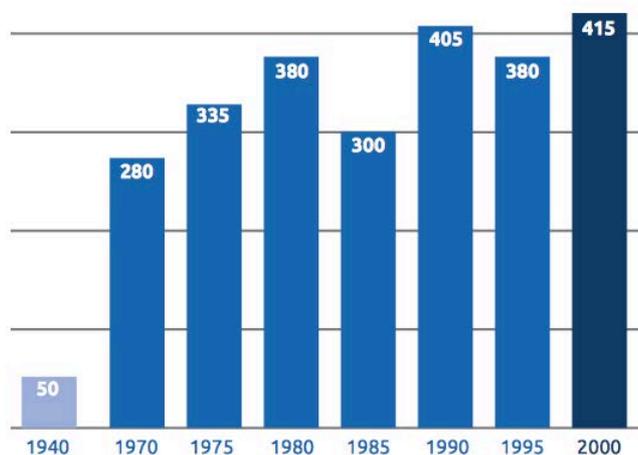
Familles	Dimensions	Classe granulaire.
Fillers	0/D	D < 2 mm avec au moins 85% de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,063
Sables	0/ D	D ≤ 4 mm
Graves	0/D	D ≤ 6,3 mm
Gravillons	d/D	d ≥ 2 mm et D ≤ 63 mm
Ballasts	d/D	d=31,5mm et D=50 ou 63mm

**Tableau 1: Granulométrie des granulats, (Source : infociment.fr)**

En plus de la taille du granulat, il existe aussi d'autres caractéristiques géométriques (granularité, aplatissement, angularité), physiques (les tests LA, SZ, MDE, PSV, AAV), chimiques (Chlorure, soufre, alcalin et silice). Celles - ci sont définies par les entreprises en fonction de leurs usages prévues.

## 1. La consommation de granulat en France

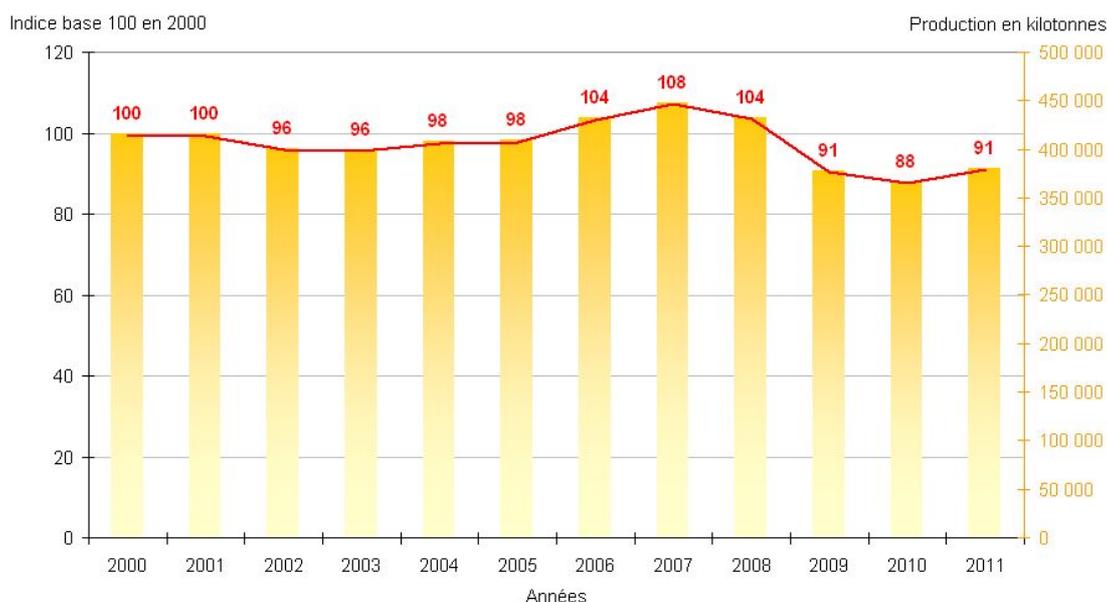
Présents dans notre environnement, il représente la deuxième ressource la plus utilisée dans le monde après l'eau. Des années 1940 aux années 2000, les grands travaux de construction ont utilisé énormément de granulats (*Fig.1*) (*unpg.fr*).



**Figure 1:** Evolution de l'utilisation de granulats en millions de tonnes.

Selon l'Union nationale des industries de carrières et matériaux de construction (Unicem), la France a utilisé 379 millions de tonnes de granulats. Après une stabilité dans les années 2000, la production de granulat a augmenté entre 2006 et 2008 suivie d'une baisse (*Fig.2*). Toujours selon l'Unicem, la consommation moyenne de granulats est estimée à 400 millions de tonnes par an, c'est à dire 7 tonnes / an par habitant, soit 20 kg/jour.

Évolution de la production totale de granulats en France métropolitaine, entre les périodes 2000 et 2011  
Indice base 100 en 2000 et production en kilotonnes



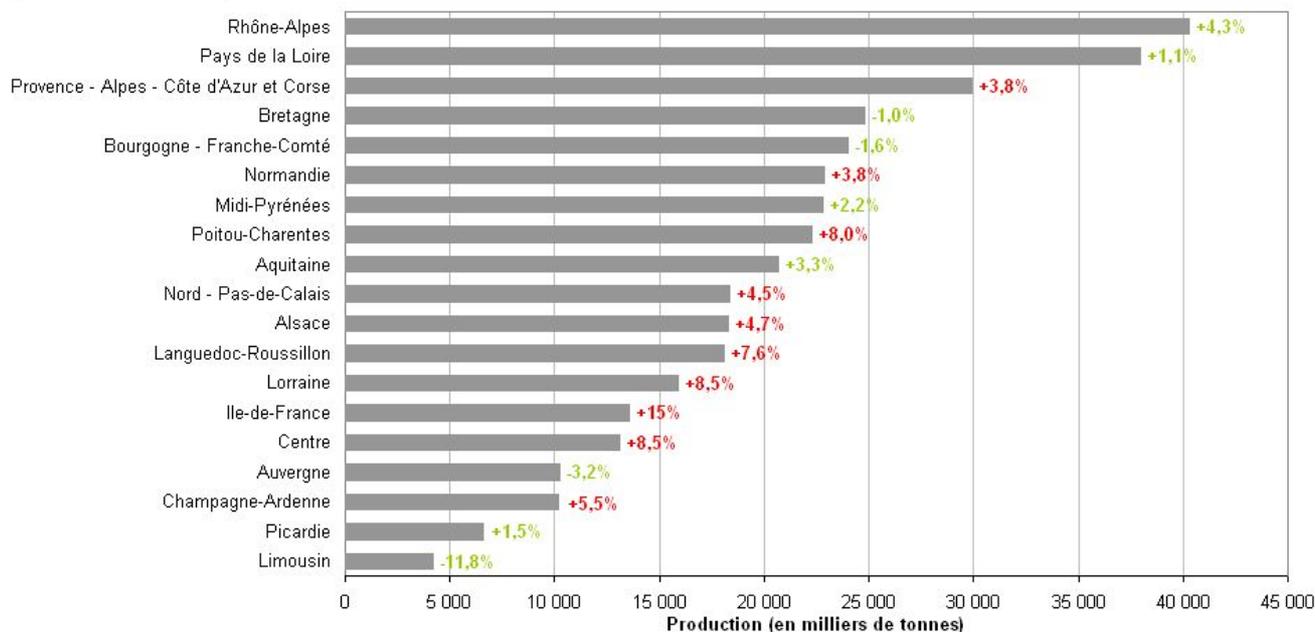
Source : Unicem - Insee Pôle Statistiques Industrielles, 2011.

**Figure 2:** Evolution de la production totale de granulats en France métropolitaine

Cette production est soutenue par les régions de Rhône –Alpes et Pays de la Loire qui détenaient le cinquième de la production entre 2010 et 2011. Les régions de l’Auvergne, du centre, de Champagne-Ardenne, Île-de-France, Limousin et Picardie fournissent que 15% de la production nationale. La diminution de production a été observée dans toutes les régions sauf en Alsace, en Lorraine et en Provence-Alpes Côte d’Azur et Corse. (fig.3)

### Production totale de granulats en 2011 et évolution par rapport à 2010, par région

(en milliers de tonnes)



**Note :** Les chiffres déterminent l'évolution de la production totale de granulats entre 2010 et 2011 pour chaque région, en comparaison à la moyenne nationale (+3,8 %) : en rouge, les régions pour lesquelles la production de granulats est plus importante entre 2010 et 2011 par rapport à la moyenne nationale et en vert celles pour lesquelles elle est moins importante.

**Source :** Unicem - Insee Pôle Statistiques Industrielles, 2011.

**Figure 3: évolution de la production de granulats par région en 2011 (Source: Unicem, 2011)**

#### 1. Les types de gisements.

Au vu de la diversité de la géologie française, on retrouve plusieurs types de gisements repartis sur tout le territoire qui se différencient par leur nature et leur origine (fig.4).

Selon leur nature, on distingue

- les granulats alluvionnaires : matériaux non consolidés d'âge quaternaire issus des mouvements des glaciers et des cours d'eau. On les retrouve principalement sur les terrasses fluviales, dans les lits (anciens ou actuels) des rivières et dans des paléolacs. En fonction de la présence d'une nappe phréatique et de sa connexion avec un cours d'eau à proximité, ce type de gisement peut être exploité en eau ou à sec.
- Les granulats de roches massives : matériaux consolidés qui proviennent des roches dites dures. La répartition des gisements dépend de la géologie et du type de roches. Il se localise généralement dans les chaînes de montagnes.
- Les granulats recyclés qui sont issus du concassage des matériaux démolis.

Ces granulats proviennent d'origines différentes :

- Les roches magmatiques (éruptives et volcaniques) et les roches métamorphiques généralement massives qu'on retrouve dans les chaînes de montagnes.

- Les roches sédimentaires, meubles ou massives (calcaires.) qu'on retrouve dans les bassins sédimentaires et les chaînes de montagnes.

La répartition des gisements de granulat en France est donc fonction de leur nature, leur source mais également de la géomorphologie.



Positionnement	Type de gisements	Origine	Consommation
1	Alluvions glaciaires	Moraines	41% roches meubles
2	Sables et graviers	Granulats alluvionnaires fluviatiles	
3	Brèches de pentes et éboulis de piedmont	Erosion de pente, piedmont de régions montagneuses	
4	Sables, graviers et galets du littoral	Deltas, dunes, cordons littoraux, plages	
5	Alluvions marines	Plateau continentale	
6	Couches de sables ou de sablons	Roches sédimentaires non consolidées	
7	Calcaires ou grès	Roches sédimentaires consolidées	55% roches massives
8	Quartzites, gneiss	Roches métamorphiques dures	
9	Granites, gabbros,	Roches éruptives anciennes	
10	Basalte, andésite	Roches volcaniques récentes	
11	Granulats issus de recyclages	Bâtiments, chaussées, industrie	4% recyclage

**Figure 4: Répartition des gisements de granulats en fonction de leur localisation et leur origine géologique (Source : Unicem, 2003).**

Les sols sableux des grandes vallées sont les plus demandés. En 2011, les roches meubles constituent environ 40% de la demande nationale, les roches massives 55% et 5% les matériaux recyclés.

#### ❖ Cas de la région de l'Occitanie.

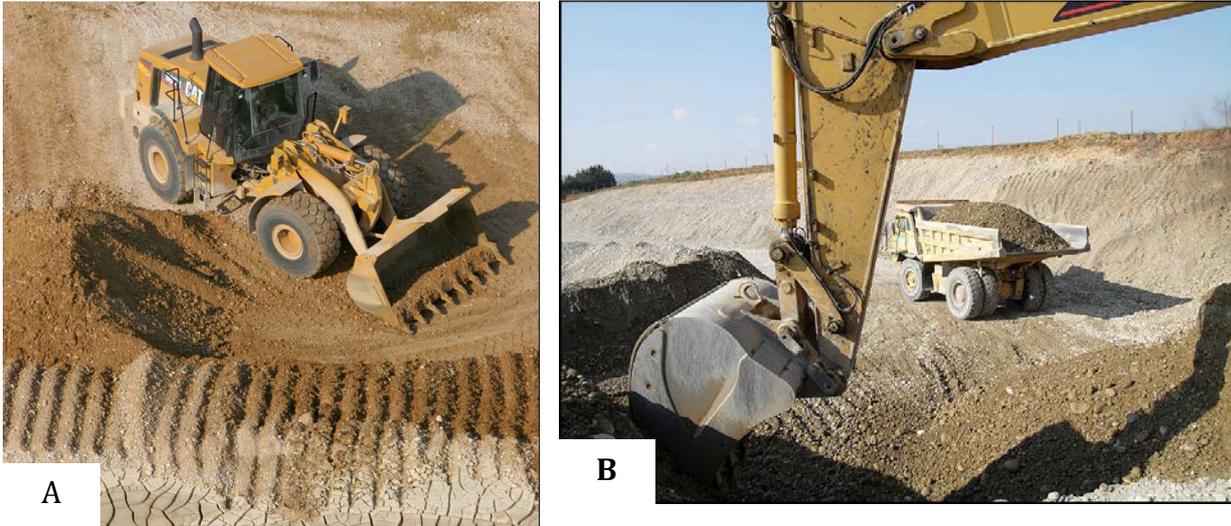
L'Occitanie est une région dynamique le domaine d'extraction de granulat. Ce dynamisme s'explique par la présence de nombreux gisements d'alluvions fluviatiles et fluvio-glaciaires. La répartition de ces alluvions est le résultat de la présence de cours d'eaux et de la chaîne pyrénéenne. Les principaux fleuves qui sont la Garonne et l'Adour ont transporté de grandes quantités d'alluvions qui proviennent, soit en grande partie des Pyrénées d'où ils prennent leurs sources, soit de l'érosion de ces fleuves lors de leur écoulement. Ces quantités d'alluvions ont été déposées dans les différents lits. On retrouve des gisements de roche meuble sur les terrasses fluviatiles qui correspondent aux différents lits de la Garonne et dans les lits actuels de la Garonne, l'Ariège, le Neste, le Tarn. A cela s'ajoute les alluvions fluvio-glaciaires qui proviennent de l'eau de fonte des glaciers des Pyrénées.

## 2. Les modes d'extraction.

Après le décapage qui consiste à retirer les terres inexploitable, l'extraction se fait différemment en fonction des types de gisements.

Concernant les gisements de roches massives compacts, elle nécessite l'utilisation d'explosifs. Qui sont placés dans des trous de forage. Les matériaux sont ensuite ramassés pour le processus de traitement composé du concassage, du criblage et du lavage. (Unpg)

Concernant l'extraction des roches, il peut être soit en milieu terrestre ou en milieu hydraulique. En milieu terrestre, il est effectué à l'aide de pelles hydrauliques et les chargeuses (Fig. 5).



**Figure 5:** A-une chargeuse; B- une pelle hydraulique et en arrière plan un Dumper (Source : Vicat)

En milieu hydraulique peu profond, l'extraction est réalisée depuis la rive avec des pelles à câbles munies de dragueline (Fig.6), des pelles hydrauliques ou des excavateurs à godets. Lorsque le site est plus profond, l'extraction est réalisée avec des engins flottants tels que les dragues à godets (Fig.7), a grappin ou suceuse. Dans les deux cas, les matériaux extraits sont acheminés au centre de traitement soit pas camion ou par bateau (unpg).



**Figure 6:** Extraction avec une dragueline (source : Vicat)



**Figure 7:** extraction avec une drague à godet (source : Vicat)

La difficulté dans l'extraction des roches meubles en milieu hydraulique réside dans le suivi du gisement. En plus d'une maille large, la taille des engins et leur maniabilité réduite ne permet pas un suivi minutieux du gisement en eau.

L'une des problématiques des carrières, à la fin de leur permis d'exploitation, est la connaissance du volume du gisement. Est ce que le volume maximum de gisement a été extrait ? Est ce qu'il en reste suffisamment pour prolonger le permis d'exploitation ?

Ce sont plusieurs problématiques que GEOFALCO espère résoudre d'où l'initiation de projet de ce recherche.

### **3. Le réaménagement des sites d'extraction**

Avant 1994, l'activité d'extraction de granulat n'était pas bien réglementée. Elle a connue une évolution progressive entre 1970 et 1979.

En 1994, l'arrêté ministériel du 22 septembre 1994 dit en son article 12.2 :

*« L'exploitant est tenu de remettre en état le site affecté par son activité, compte tenu des caractéristiques essentielles du milieu environnant. La remise en état du site doit être achevée au plus tard à l'échéance de l'autorisation, sauf dans le cas de renouvellement de l'autorisation d'exploiter.*

*Elle comporte au minimum les dispositions suivantes :*

- *La mise en sécurité des fronts de taille ;*
- *Le nettoyage de l'ensemble des terrains et, d'une manière générale, la suppression de toutes les structures n'ayant plus d'utilité après remise en état du site ;*

- *L'insertion satisfaisante de l'espace affecté par l'exploitation dans le paysage compte tenu de la vocation ultérieure du site. »*

Le réaménagement se fait progressivement durant le permis d'exploitation. Le type de réaménagement est décidé d'un commun accord entre les propriétaires, les riverains, les associations, les communes et les pouvoirs publics. Les réaménagements dépendent du type de carrière (en eau ou à sec) et de l'environnement du site (urbain. Rural...).

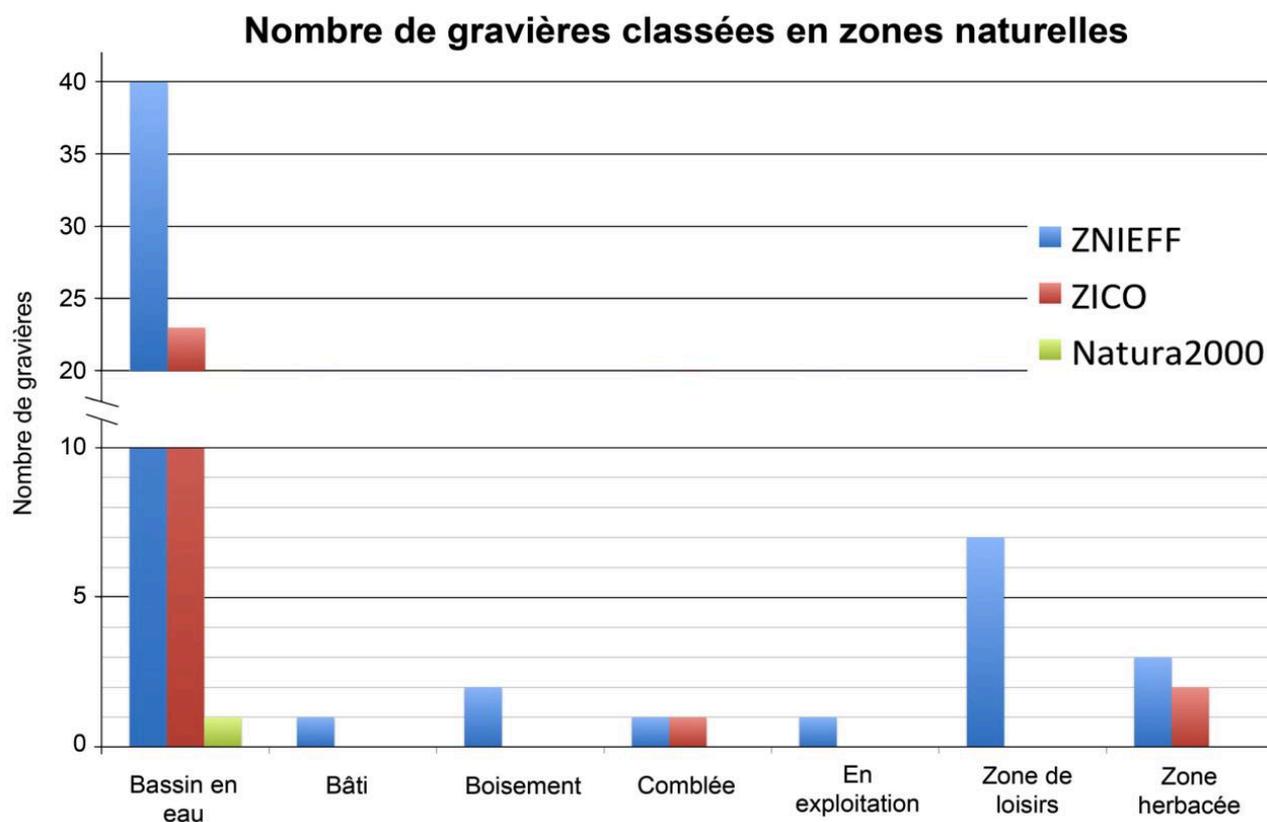
L'union des producteurs de granulats a répertorié le type de réaménagement en fonction du type de carrière et de son environnement immédiat.

Type de caractéristiques		Critères d'environnement	Possibilités d'aménagement
Carrière en eau			
Faible profondeur		Rural	Réserve ornithologique - Chasse du gibier d'eau, Réserve d'eau - Mise hors d'eau et réutilisation agricole et sylviculture
		Périurbain	Coupure dans l'urbanisation - Remblayage partiel ou total pour utilisation en zones vertes et de loisirs ou en zones constructibles
Profondeur d'eau moyenne ou forte		Rural	Pêche de loisir - Pisciculture - Baignade-Barque et canotage- Port de plaisance - Bassin d'infiltration – Bassin de stockage
		Périurbain et urbain	Plan d'eau (lotissement au bord de l'eau) – Port industriel – Port de plaisance – Bases de loisirs polyvalentes
Carrière à sec			
En fosse		Rural	Reconstitution du terrain – Reverdissement agricole – Reboisement – Réserve naturelle
		Périurbain et urbain	Remblayage – Coupures ventes – Parc – Zone d'habitation – Zone industrielle – Lac artificiel
A flanc de relief	Parois meubles	Tous environnements	Mise en végétation
	Parois rocheuses	Vues éloignées Vues rapprochés	Confortement et traitement de la paroi – Talus végétalisé
	Fond des carrières	Rural	Mise en végétation (prairie, agriculture, sylviculture) – Réserve naturelle.
		Périurbain et urbain	Parc de verdure – Parc de véhicules – Zone industrielle – Zone de loisirs – Terrain de sport

**Tableau 2: Différents types de réaménagements (source : unpg)**

Les anciennes carrières peuvent être classées en zone protégée. En 2012, le rapport des étudiants de master 2 Aménagement du Territoire et Télédétection de Toulouse-Auch (A3TA) ont étudié le réaménagement des carrières dans la périphérie Sud de Toulouse. Selon cette étude, près de 22 % des gravières en fin d'exploitation ont été classées en zone protégée en 2010:

- Zone d'importance communautaire pour les oiseaux sauvages (ZICO).
- Zones Naturelles d'Intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF).
- Natura 2000.



**Figure 8:** répartition des anciennes gravières réaménagées en zone protégée dans le sud de Toulouse (..)

## II. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE

Fondé en Aout 2013 par son gérant Mathieu DE PINEL, GEOFALCO est une entreprise de production de données géographiques de haute précision qui permet de répondre aux besoins du marché dans la gestion et l'aménagement du territoire. Elle utilise des drones aériens et marins pour fournir des données 2D/3D qui sont des outils d'aide à la décision dans plusieurs secteurs variés : l'extraction de granulats, l'agriculture de précision, les levés topographiques, la gestion forestière, la viticulture, la gestion des risques etc.....



GEOFALCO se distingue par

- sa réactivité lors de ces prestations : ces livrables sont disponibles entre 48h et 72h selon le projet,
- son savoir-faire dans la réalisation de missions aériennes, l'utilisation de drones aériens et marins, ses connaissances en géomatique et en télédétection,
- sa précision : ces données de haute résolution peuvent atteindre jusqu'à 3 cm au sol par pixel.

Il fournit plusieurs types de prestations en fonction des demandes de ces clients :

### 1. Analyse environnementale.

GEOFALCO réalise des levés pour des études environnementales telles que l'analyse de l'érosion des berges, l'évaluation des hauteurs d'obstacles à la continuité écologique et les études topographiques des plans d'eau.

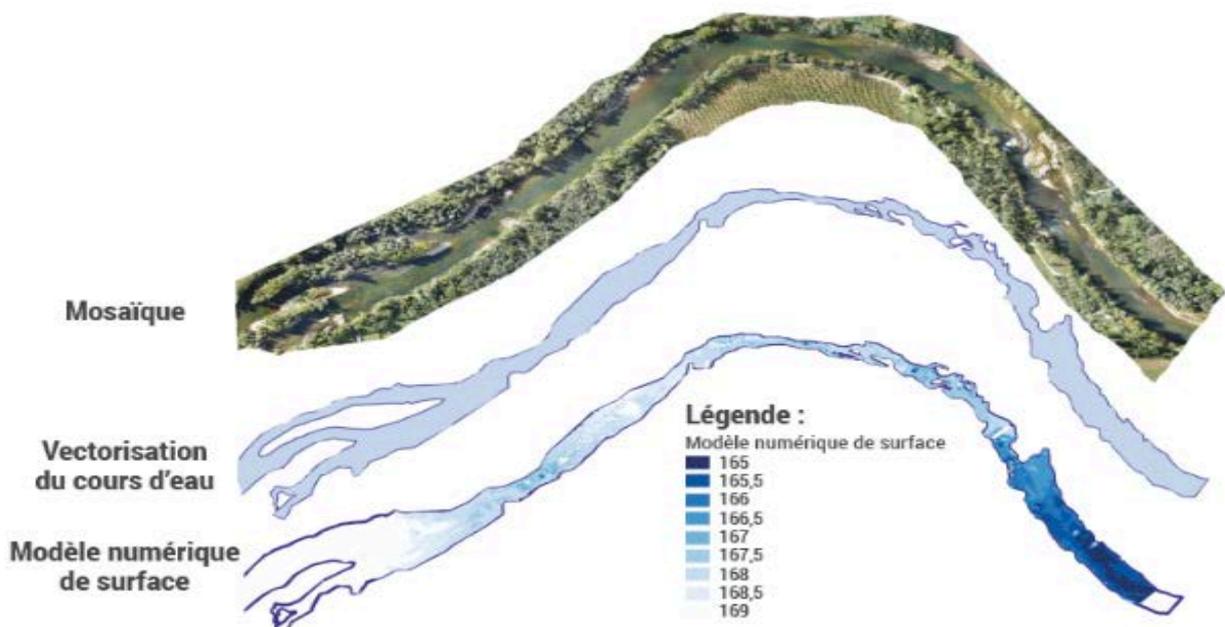


Figure 9: Analyse environnementale d'un cours d'eau

## 2. Prestations topographiques.

A l'aide de ces drones aériens, GEOFALCO fournit une modélisation géoreferencée en 3 dimensions de carrières d'extraction de matériaux. (Fig. 10). Ces modélisations sont accompagnées, à la demande de la clientèle, de plans d'exploitation (Fig. 10), plans topographiques, de cartes volumétriques et de rapports d'estimation de volume. Pour la réalisation de ces cartes topographiques, il effectue des vols selon une maille définie sur le site. La maille resserrée, possible grâce aux drones aériens, permet d'avoir une densité de données qui seront traitées sur plusieurs logiciels spécifiques pour l'obtention de la carte 3D à haute résolution du site. Ces cartes servent aux clients pour définir les volumétries des matériaux extraits, connaître l'évolution du site, anticiper l'extension de l'extraction sur le site et le stockage de matériaux inertes qui seront utilisés pour le réaménagement des sites d'extraction.

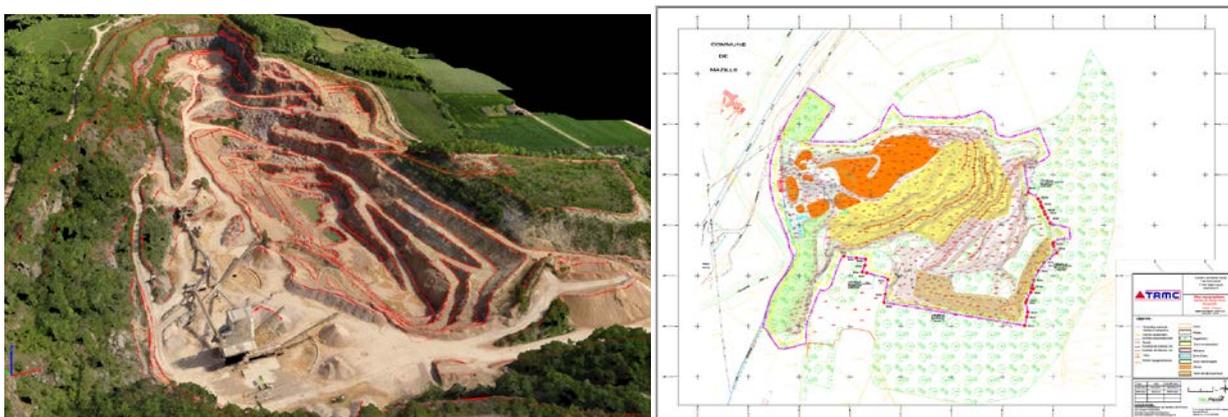


Figure 10: A droite, modélisation en 3 dimensions d'une carrière. A gauche, plan d'exploitation de la carrière

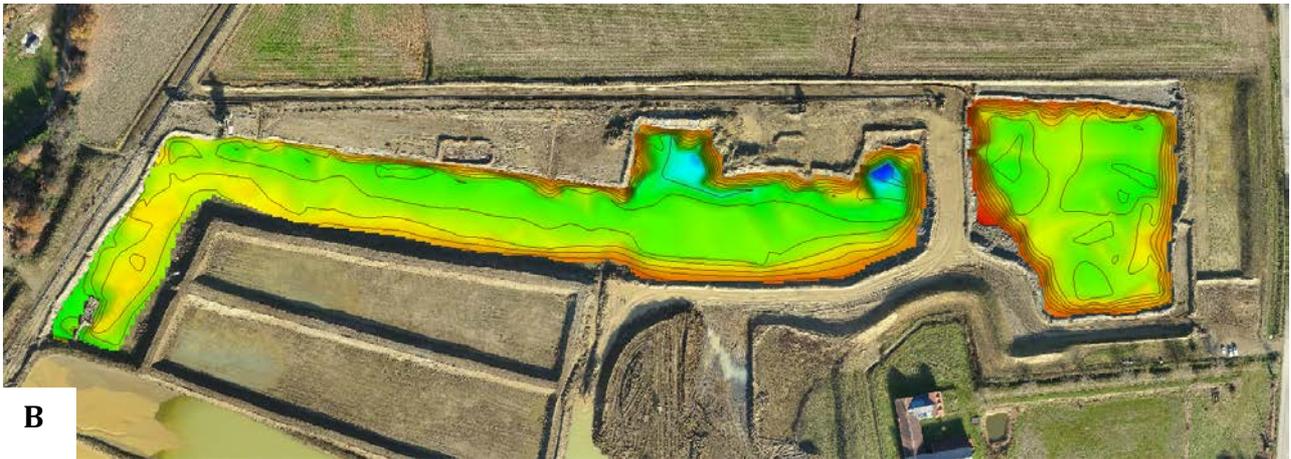
## 3. Prestations bathymétriques.

Elle représente la plus importante de ces commandes derrière les prestations topographiques. Pour la production de ces cartes, GEOFALCO possède des drones catamaran équipé de sondeurs mono faisceaux, d'un système d'enregistrement autonome et d'un GPS. Comme pour les levés topographiques, les drones lui permettent d'obtenir une densité importante de données en un temps réduit.

Ces cartes permettent de connaître le volume de matériaux extraits en eau et de suivre la conformité des sites par rapport aux contraintes environnementales proche des cours d'eau.



A



**Figure 11:** A- plan d'eau; B- carte bathymétrique réalisée avec un drone catamaran

Les clients s'en servent également pour effectuer un suivi aléatoire du gisement en eau pour orienter l'extraction.

Au vu de la demande des clients pour un suivi minutieux des gisements en eau, GEOFALCO tente de développer une méthodologie permettant d'estimer l'épaisseur des gisements de granulats en eau.

### **III. ETAT DE L'ART**

#### **1. Mise en place des gisements alluvionnaires**

Les gisements alluvionnaires se localisent généralement dans deux sites géologiques distincts : les paléo-lacs et les terrasses fluviales.

##### **a) Les paléolacs glaciaires**

Il résulte de la dynamique des glaciers lors de l'alternance des périodes glaciaires et interglaciaires.

En période glaciaire, les températures froides et les précipitations de neige favorisent la formation de glaciers dans les montagnes (*Fig. 12*). La période glaciaire est suivie de la période interglaciaire, cette dernière est caractérisée par la hausse des températures. La transition entre ces deux périodes est marquée par le recul des glaciers. La mise en place et le retrait des glaciers provoquent un surcreusement pour aboutir à la formation des vallées glaciaires. Les blocs de glaciers laissés pendant le retrait fondent et transforment les vallées en lacs glaciaires (*Guillen et al., ) (Fig. 12)*.

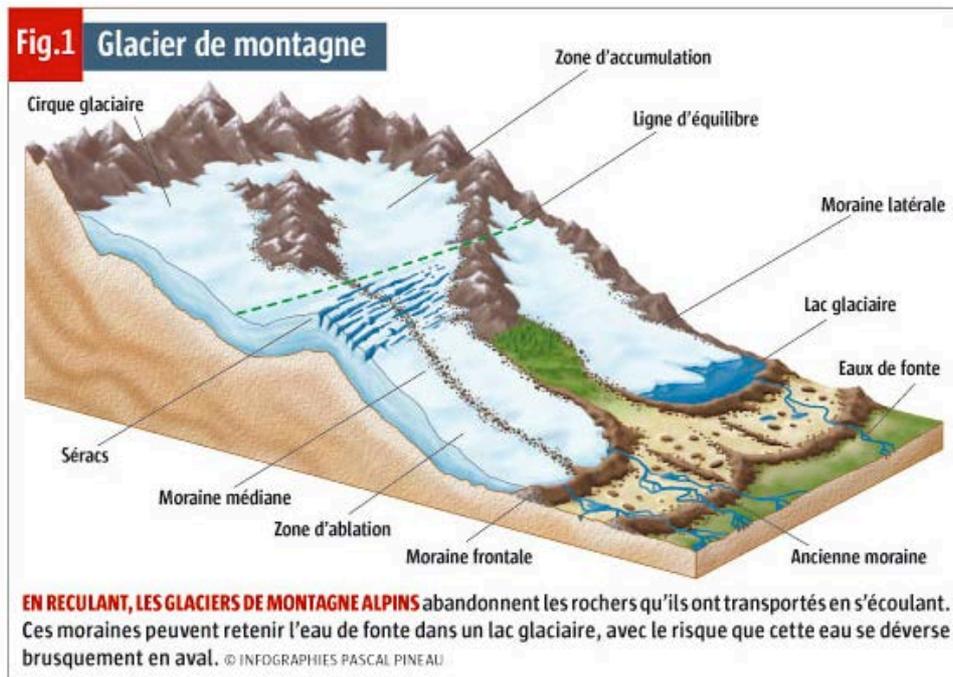


Figure 12: Dynamique des glaciers, exemple de la chaîne Alpine (source : <http://tp-svt.pagesperso-orange.fr/glaces.htm>)

L'évolution naturelle des lacs les conduit progressivement vers un comblement du fait de l'érosion du bassin versant et de l'enrichissement progressif en matière organique. Dans certaines vallées comme celui de l'Isère dans le sillon alpin ou la vallée de la Garonne dans le Sud des Pyrénées, l'apport sédimentaire apporté par les cours d'eaux extérieurs a accéléré le comblement de ces lacs glaciaires. Finalement, le lac se comble entièrement à l'aide des sédiments dit fluvio-glaciaire (Fig. 13) qui sont issus de l'érosion des glaciers. Ces sédiments fluvio-glaciaires sont exploités actuellement en amont de moraines frontales développées durant les périodes glaciaires.

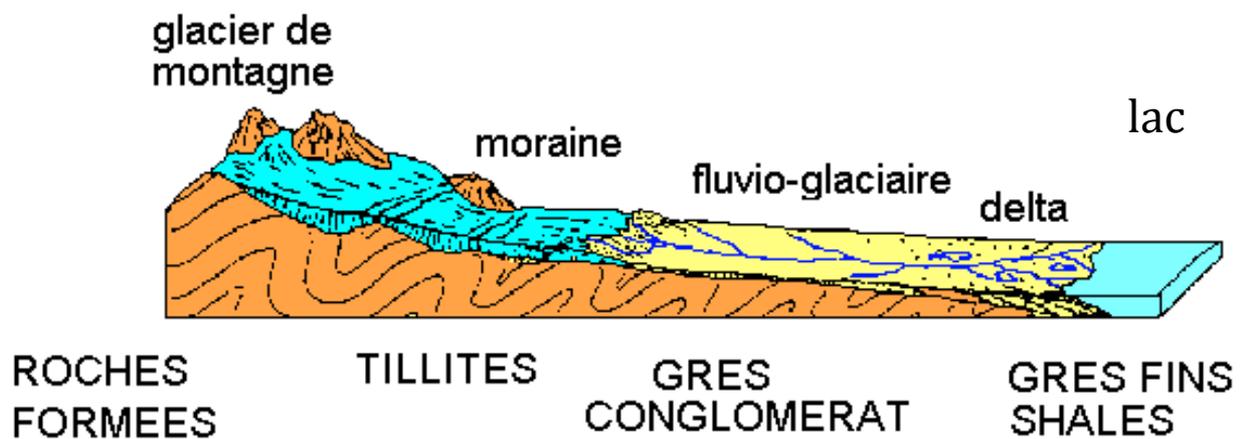
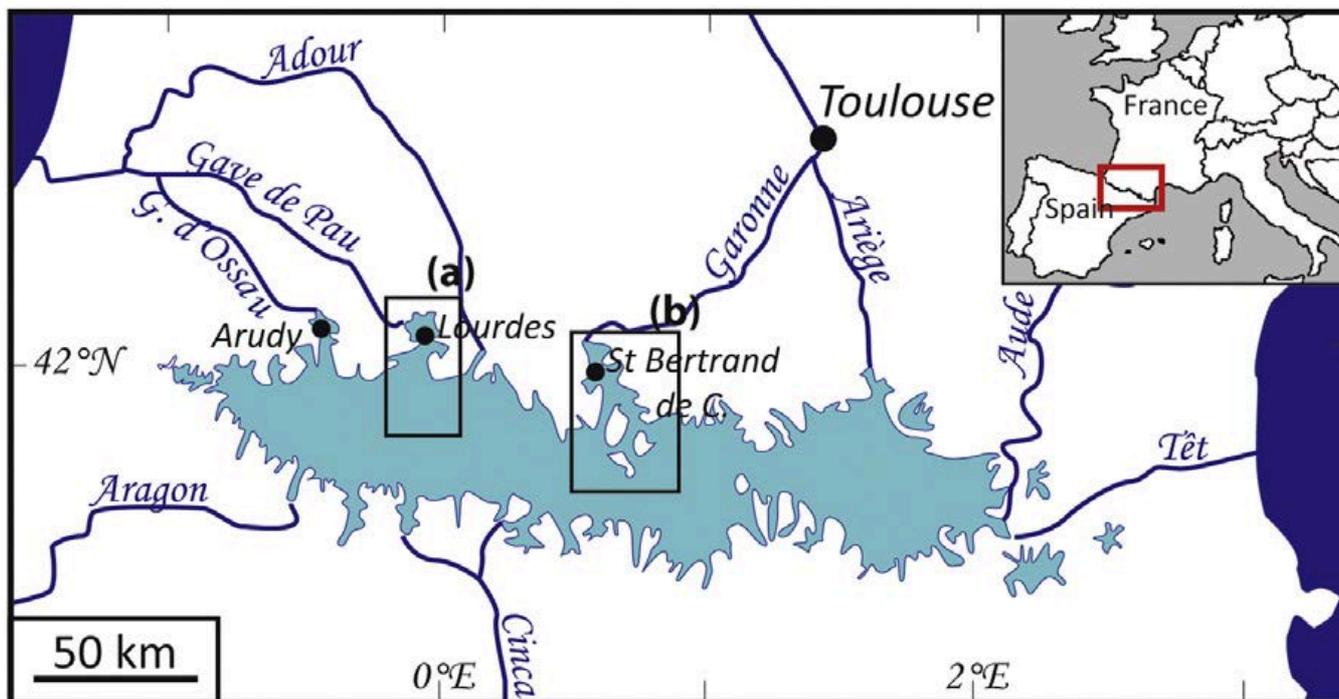


Figure 13: profil transversal de la distribution sédimentaire suite à un retrait de glacier (<https://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours-sed/sed-5.htm>)

### *i. Dans le piedmont des Pyrénées.*

La répartition des gisements de granulats dans le piedmont de la chaîne pyrénéenne est le résultat de l'activité des glaciers et des cours d'eau après le dernier maximum glaciaire durant le pléistocène (-120000 à -10000 ans). Plusieurs vallées pyrénéennes ont été modifiées lors de cette dernière période glaciaire. Les Quatre principales vallées du Nord des Pyrénées sont le Gave de Pau, la Garonne, l'Ariège et l'Ossau. Les vallées de la Garonne et du Gave de Pau étaient occupées par des langues glaciaires de 80 et 60 km respectivement (Perrouy et al., 2015)



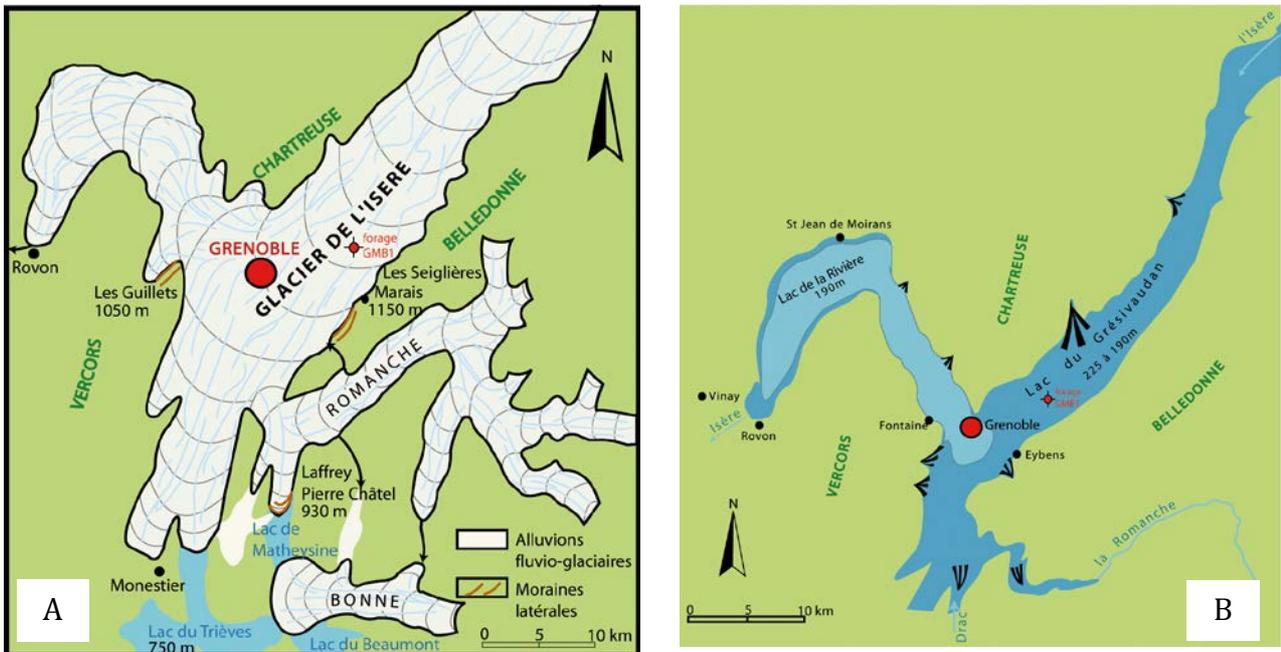
**Figure 14:** l'extension glaciaire dans le nord pyrénéenne avec les vallées de la Garonne, l'Ariège, l'Ossau et du Gave de Pau. (Perrouy et al., 2015)

Dans la vallée de la Garonne, la forte érosion glaciaire a conduit à la formation de lacs glaciaires dont l'unique vestige est le lac de Barbazan qui a été comblé par les alluvions fluvio-glaciaires. Toute la vallée de la Garonne, en amont des moraines de Barbazan a été recouverte d'alluvions fluvio-glaciaires issues de l'érosion glaciaire et déposée soit par les eaux de fonte soit par les cours d'eaux tels que la Garonne.

La Garonne a largement participé à la répartition des gisements alluvionnaires. Elle s'écoule de l'Ouest vers l'Est de la chaîne pyrénéenne en passant par la zone axiale. La partie supérieure de la vallée est recouverte de sédiments quaternaires postglaciaires. Au vu de la différence d'altération, les moraines situées en aval de Barbazan semblent plus vieilles que le dernier maximum glaciaire. Il pourrait être attribué au Würm ancien.

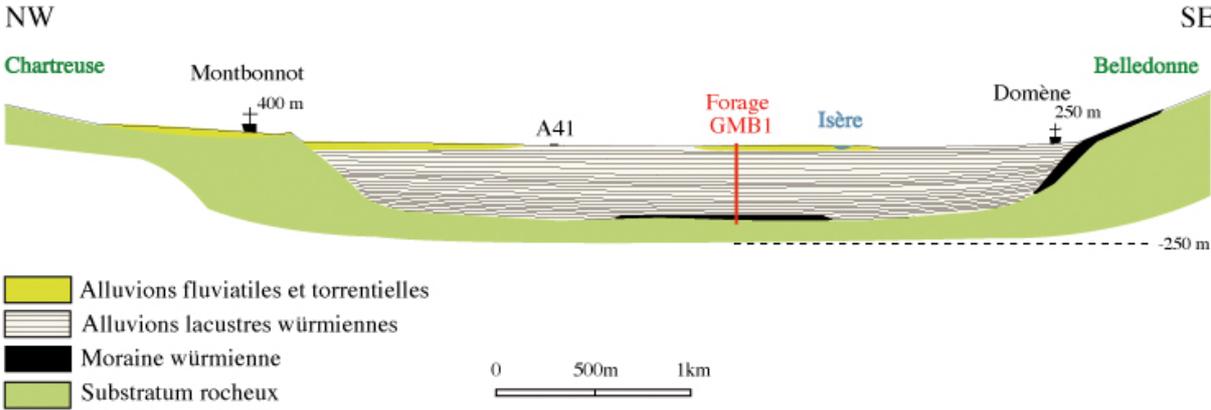
### *ii. Dans le sillon alpin.*

La partie sud du sillon alpin qui s'étend d'Albertville au Nord à Grenoble au Sud, a connu une activité glaciaire intense lors des extensions glaciaires du Riss et du Würm. La vallée du Grésivaudan, longue de 150km, s'est formée suite au retrait du glacier de l'Isère (Fig.15-A).



**Figure 15:** A- Glacier de l'Isère lors du dernier maximum glaciaire; B- Formation du lac du Grésivaudan suite au retrait du glacier de l'Isère

Il s'en est suivi la formation du lac de Grésivaudan (*Fig.15-B*). Ce lac a été comblé par les alluvions provenant de l'érosion des glaciers. L'apport sédimentaire provenait aussi des lacs d'extrémité des vallées tels que les lacs de Rivière et des cours d'eau de l'Isère, de l'Arc, de la Romanche et du Drac. L'épaisseur des sédiments lacustres et fluviale atteint 530 m (Forage de Domène) et jusqu'à 900 m en aval de la ville de Grenoble. Ces gisements d'alluvions sont aujourd'hui exploités dans la vallée du Grésivaudan, à proximité du lit actuel de l'Isère.



**Figure 16:** séquence sédimentaire dans le paléolac du Grésivaudan avec le forage GMB1 de Domène.

Aussi bien dans le piedmont des Pyrénées que dans le sillon des Alpes, les gisements les plus exploités sont les séquences fluviales situées au top (*Fig.16*). Dans un système deltaïque, les sédiments sont triés selon la granulométrie : les plus grossiers se trouvent en amont et les plus fins en aval tout le long du profil. Dans le début de l'exploitation, les gisements alluvionnaires correspondaient aux sédiments les plus grossiers.

## b) Les terrasses fluviales.

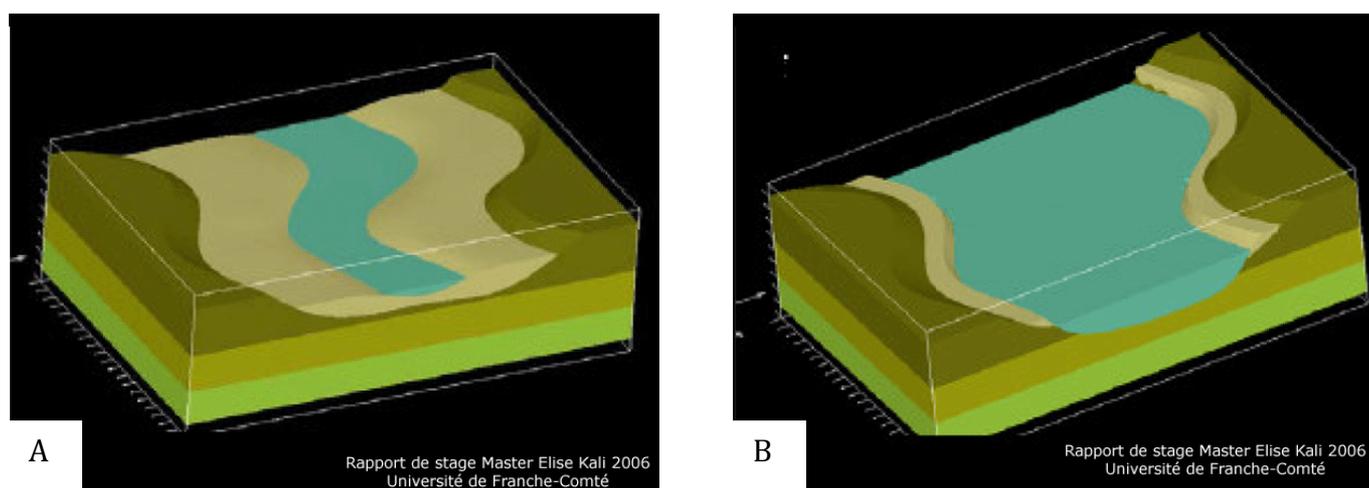
Une terrasse fluviale est un gradin topographique situé dans une vallée. Une terrasse est composée d'un palier horizontal et d'une dénivellation qui surplombe une autre terrasse. On distingue deux types de terrasses : les terrasses fluviales et les terrasses emboîtées.

Les terrasses étagées sont une succession de paliers parallèles et horizontaux. Généralement, le palier horizontal est composé en partie ou totalement d'alluvions. On considère que les alluvions proviennent de la circulation et de l'affaissement d'un cours d'eau. Par contre, la succession d'étage peut s'expliquer par deux phénomènes :

- une surrection causée par un mouvement isostatique de l'écorce terrestre,
- les variations des niveaux marins : en période de bas niveau marin, le rapport charge / débit est importante : il y a sédimentation. Mais en période de haut niveau marin, le rapport charge / débit est faible, il y a surcreusement du lit préexistant.

En région de montagne, la formation des paliers est fonction de la dynamique des glaciers. L'étagement des terrasses résulte de la surrection des montagnes dont l'érosion fournit la charge sédimentaire des cours d'eau. La surrection de la partie amont du bassin versant se traduit par l'érosion du cours d'eau en aval. Aussi, le débit des cours d'eaux est contrôlé par la fonte des glaciers. En période glaciaire, la formation des glaciers réduit le débit des cours d'eau qui a provoqué leur sédimentation (*Fig.17-A*). Lors de la période interglaciaire, la fonte des glaciers alimente le débit du fleuve qui favorise leur surcreusement (*Fig.17-B*). La succession de ces phases de surcreusement et sédimentation aboutit à la formation de terrasses fluviales étagées.

Les terrasses fluviales emboîtées sont le résultat de la divagation des cours d'eau de type méandrique au cours d'eau du temps qui sont fonction des variations du niveau marin dans un cycle climatique. (*Fig.17-A*).



**Figure 17:** A- Rapport charge/débit élevé: sédimentation importante; B- Rapport charge/ débit faible: surcreusement du lit

### i. Les terrasses fluviales étagées de la Garonne

La Garonne est la rivière la plus importante du Sud-Ouest de la France. Elle mesure 647 m de long et couvre une superficie de 55 000 km<sup>2</sup>. (Christophoul et al., 2014). La rivière de la Garonne possède deux styles fluviaux :

- Un style en tresse : ce style est caractéristique d'une importante charge sédimentaire. Dans cette partie, le lit est large et plat.
- Un style en méandre : Il est caractéristique d'un fort débit. La rivière dissipe son énergie en suivant une ligne sinueuse qui participe à la répartition des alluvions. Suivant cette ligne sinueuse, la rivière aura tendance à éroder dans les zones concaves et à sédimenter dans les zones convexes.

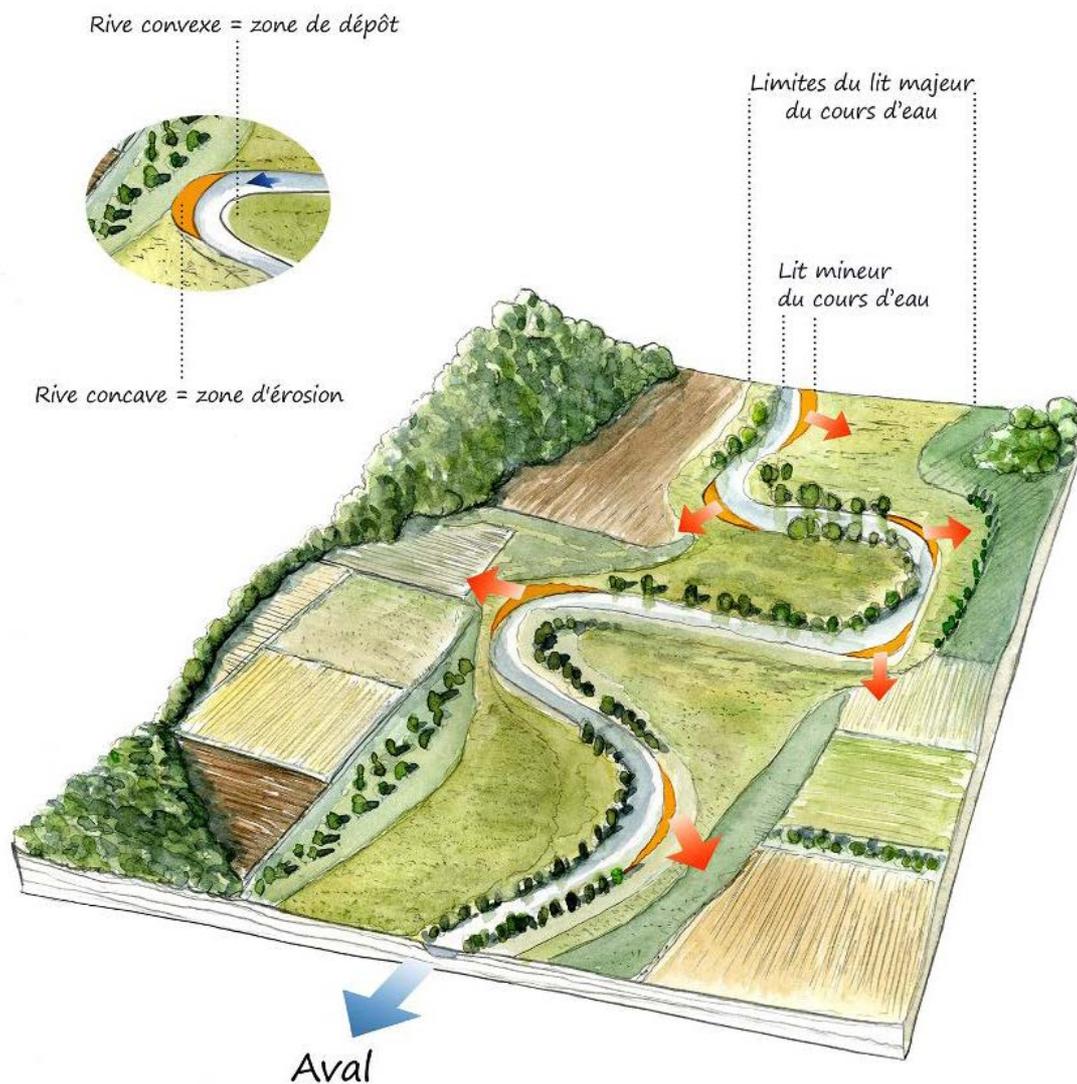
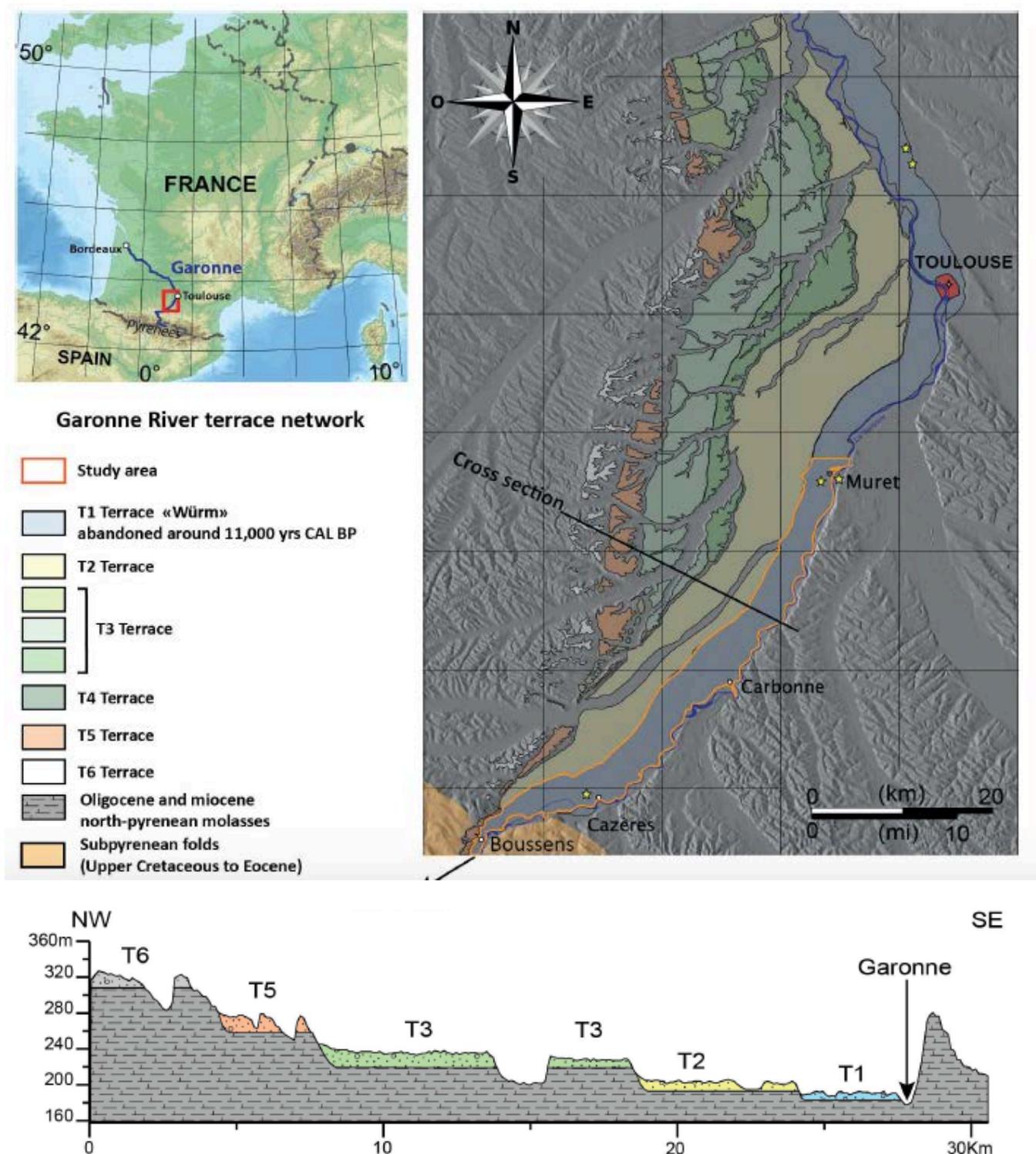


Figure 18: sédimentation d'une rivière à méandre

Six principales terrasses fluviales ont été identifiées le long de la Garonne. Numérotées de T1 à T6, T1 correspond à la terrasse la plus jeune et T6 à la terrasse la plus vieille. (Christophoul et al., 2014). Dans les études scientifiques, la chronologie de ces terrasses est peu détaillée :

- La plus vieille et la haute T6 a été datée par corrélation au quartenaire inférieure (Günz) (Icole, 1974)

- Les terrasses T5, T4, T3 et T2 ont été attribuées aux périodes glaciaires du Mindel et du Riss à cause de leur élévation et de leur altération. (*Hubschman, 1975a,b ; Stange et al., 2013*)
- La plus jeune terrasse T1 a été datée précisément grâce à des échantillons de charbon. Elle est datée à  $11,242 \pm 593$  Cal BP et  $10,651 \pm 457$  Cal BP (*Bourgeat et al., 1984. Calibration CalPal*).



**Figure 19:** Carte géologique du Nord-Pyrénéen et localisation des terrasses fluviales de la Garonne (*Christophoul et al., 2014*)

## 2. la géophysique dans le domaine des granulats.

### a) la campagne d'exploration

Après une campagne géologique de terrain qui sert à déterminer la présence d'un gisement, il s'en suit une campagne d'exploration pour pouvoir identifier avec précision l'emplacement et le volume du gisement. Cette campagne d'exploration regroupe des méthodes géophysiques qui permettent une cartographie du sous-sol et une série de sondages pour prélever des échantillons et calibrer les informations géophysiques.

Aussi bien pour les gisements de roches massives que les gisements de roches meubles, les méthodes de prospection sont les mêmes : la méthode électrique et la méthode de sismique réflexion.

#### i. Les méthodes électriques

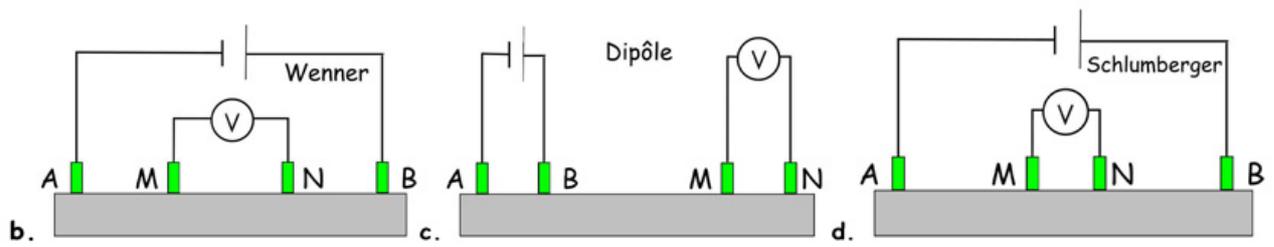
Elle permet de visualiser la différence de résistivité apparente dans le sous-sol, c'est à dire la capacité de ce sous-sol à limiter le passage d'un courant électrique. Il est possible, à partir de cette propriété, d'identifier plusieurs couches géologiques.

L'application de cette méthode nécessite au moins 4 électrodes : 2 électrodes permettant de propager le courant électrique et 2/plusieurs électrodes qui réceptionnent le courant propagé.



Figure 20: appareil de mesure géo-électrique portable 16GL-N de l'entreprise PAST (<http://www.directindustry.fr/prod/pasi/product-57451-375485.html>)

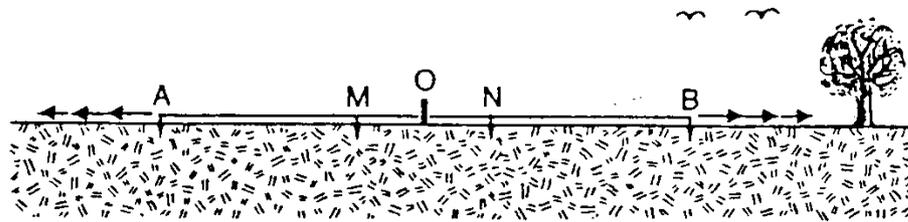
La disposition de ces électrodes sur le terrain dépend de la configuration choisie. On distingue plusieurs dispositifs (Schlumberger, dipôle, tripôle, quadripôle) qui sont fonction de l'objectif de l'étude et des caractéristiques de terrain.



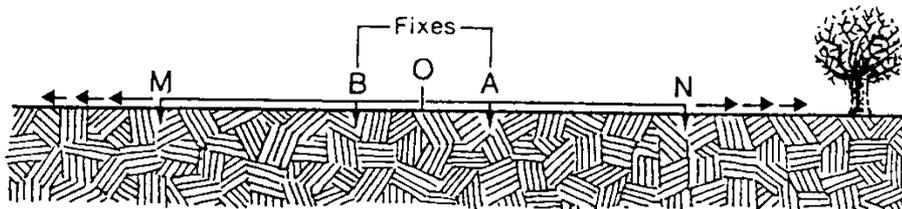
Configuration des électrodes pour une acquisition de type Wenner, Dipôle-Dipôle et Schlumberger. AB est le dipôle d'injection du courant électrique (en mA), et MN est le dipôle de mesure du potentiel électrique (en V).

Figure 21: les différents dispositifs des électrodes (<http://www.directindustry.fr/prod/pasi/product-57451-375485.html>)

Les prospections électriques les plus couramment utilisées sont le sondage électrique et la trainée électrique. Les deux se différencient par le mouvement des électrodes sur le terrain. Concernant le sondage électrique (Fig.22), les électrodes centrales restent immobiles, les électrodes latérales sont progressivement décalées selon un espacement qui évolue progressivement. Cet écart permet d'agrandir le volume de la zone de prospection et d'augmenter la profondeur d'investigation.



— Mise en œuvre d'un sondage électrique Schlumberger.



— Mise en œuvre d'un sondage électrique inverse.

Figure 22: illustration du sondage électrique avec les dispositifs de Schlumberger et de méthode inverse (<http://junon.u-3mrs.fr/ms422aww/webdocs/mst/electriques/electriques.html>)

Quand à la trainée électrique, tout le dispositif (électrodes d'émission et de réception) sont déplacés selon une maille prédéfinie pour couvrir la zone.

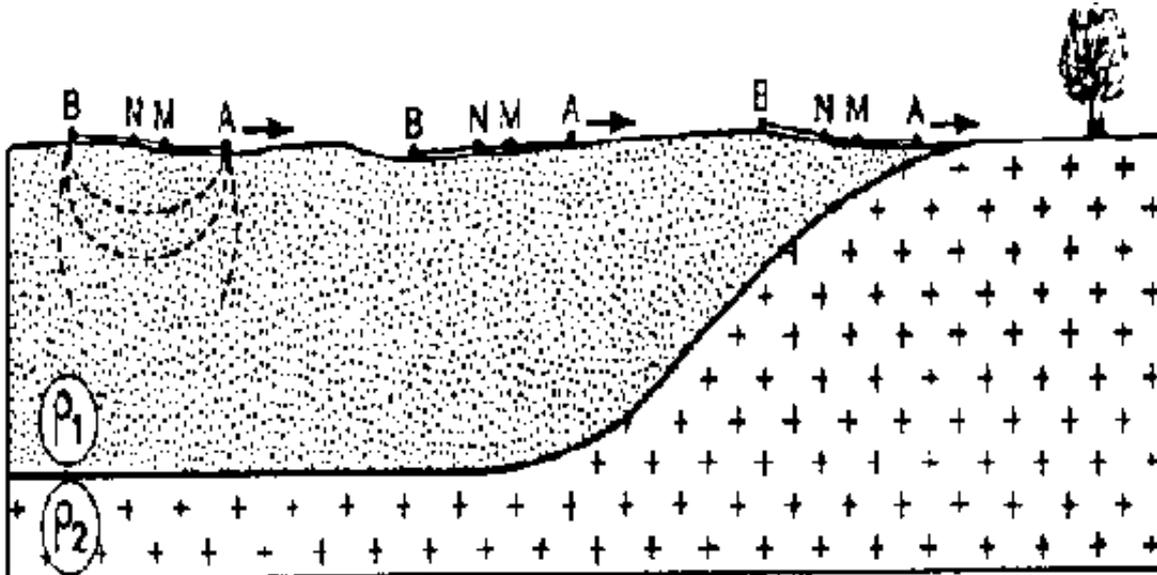


Figure 23: Illustration de la trainée électrique ([http://water-survey.net/meth\\_electrique.php](http://water-survey.net/meth_electrique.php))

Les résultats sont illustrés sur des cartes et des profils de résistivités. Les cartes permettent de visualiser la répartition horizontale de la résistivité apparente sur un espace tandis que le profil de résistivité permet de visualiser la répartition verticale de la résistivité apparente en profondeur sur un transect défini.

Les résultats permettent généralement de reconnaître des cavités et des couches superficielles géologiques en fonction de leur résistivité.

- Distribution 2D (section) ou 3D (volume) des résistivités du sous-sol

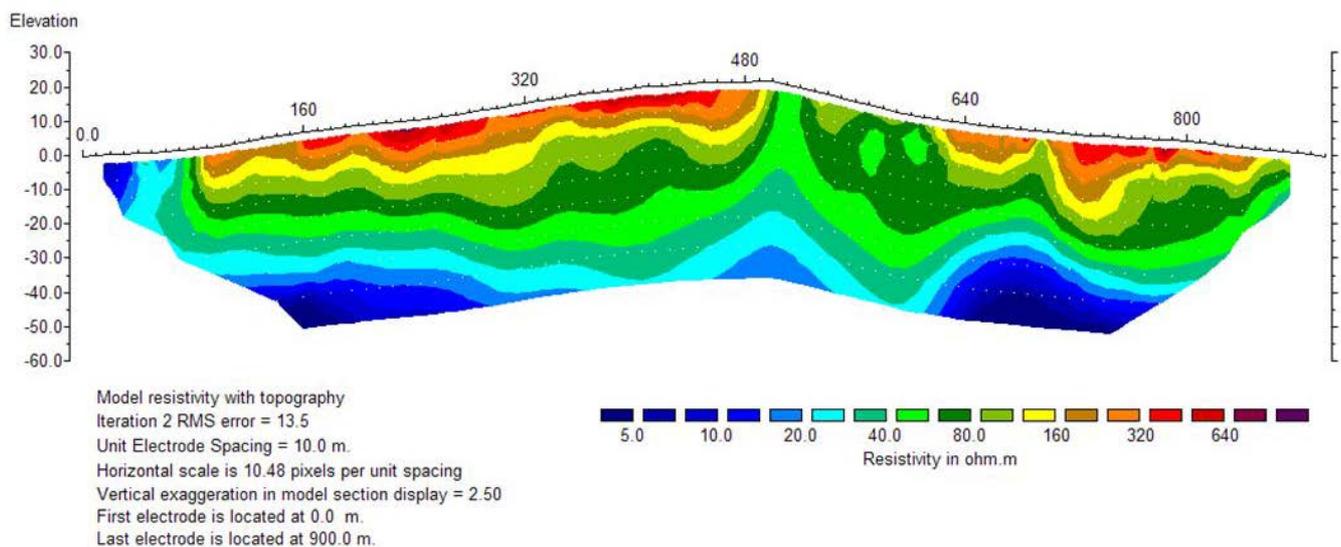


Figure 24: Exemple d'un profil de résistivité (<http://slideplayer.fr/slide/466244/>)

Les inconvénients de cette méthode sont les suivants :

- La mise en œuvre lourde,
- la difficulté pour l'injection du courant dans des milieux secs,
- l'interprétation délicate sans une corrélation avec des données de puits
- un temps de mesure assez long pour une grande zone à couvrir.

## ii. La méthode de sismique réfraction

La méthode de sismique réfraction est basée sur la propagation des ondes sismiques. Elle est surtout utilisée pour localiser la position du substratum rocheux mais peut servir également à définir l'épaisseur de couches géologiques en se basant sur la vitesse des ondes sismiques. Son principe consiste à provoquer un ébranlement en surface qui propage les ondes sismiques dans le sous-sol et à enregistrer le passage des ondes dans le temps avec des capteurs (Fig. 25-A). Cette méthode repose sur la mesure du temps le plus court que parcourt une onde entre son émetteur et son récepteur. En fonction des objectifs, on distingue soit la sismique réfraction conventionnelle ou la tomographie sismique.

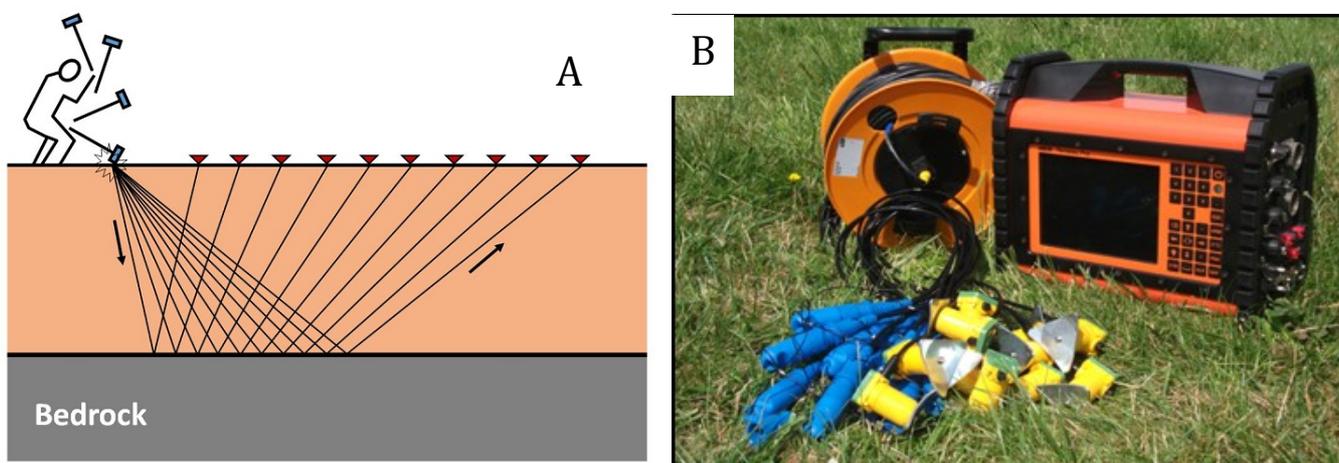


Figure 25: A- principe de la sismique réfraction (<http://www.ucltomars.org/Expe-5.html>) ; B- dispositif de la sismique réfraction (<http://www.gexplore.fr/fr/la-sismique-refraction/>)

Bien qu'adapté au milieu tabulaire, elle peut servir également pour l'identification de fracturation, d'altération ou pour définir la qualité d'un matériau.

Son dispositif est composé d'une source sismique (explosif, chute de poids, fusil sismique), de câbles de connexion, de capteurs de vibrations et d'un enregistreur sismique pour les paramètres d'enregistrement (Fig.25-B)

Cette méthode dépend essentiellement de la variation de formation géologique et l'obligation que la vitesse de propagation augmente en fonction de la profondeur. Dans le cas contraire, les couches ne seront pas visibles. Aussi, il est difficile pour cette méthode d'identifier des couches fines et peu contrastées.

Les résultats sont observés sur des profils sismiques 2D (XZ) qui illustrent les vitesses en fonction de la profondeur. En tomographie sismique, un code couleur peut être ajouté pour une meilleure visualisation.

De manière générale, on distingue :

- Une vitesse faible (300m/s) qui correspond à une couche superficielle
- Une vitesse moyenne (1000 – 1500m/s) représentatif d'une couche altérée

- Une vitesse forte (2000-4000m/s) qui correspond à une couche saine.

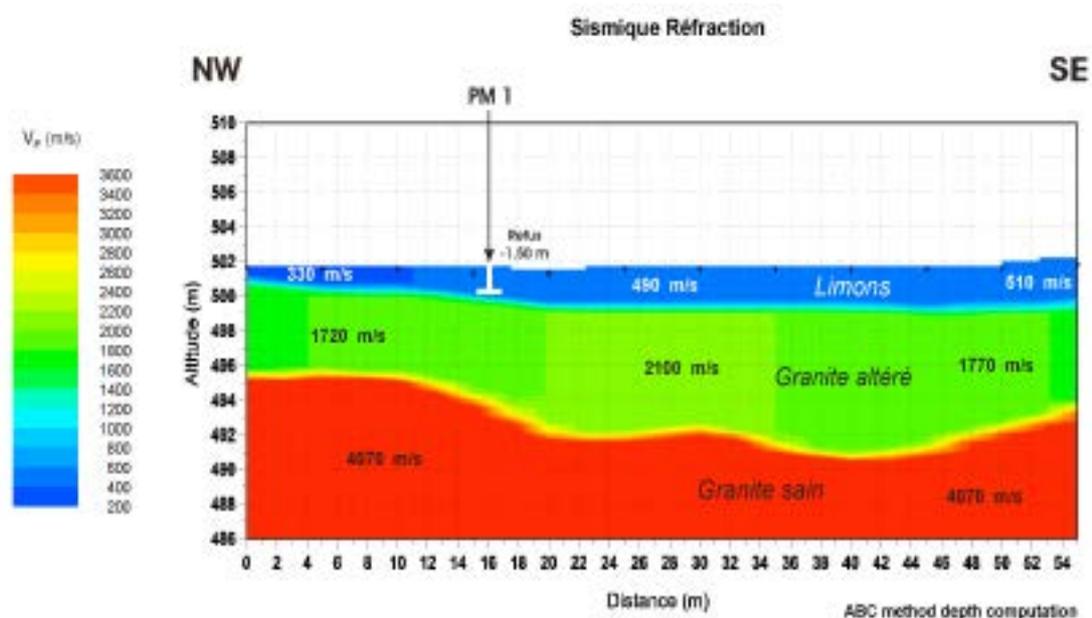


Figure 26: Exemple d'un profil sismique 2D obtenu par tomographie sismique (<http://www.geolithe.fr/sismique-refraction/>)

Ces méthodes géophysiques permettent d'établir des cartes de terrain ou de carte géophysiques qui apportent des précisions sur la structure du gisement, l'identification des zones exploitables, la précision du nombre et de l'emplacement des sondages pour la validation des données géophysiques et l'extrapolation des données dans des zones inaccessibles.

Elles sont complémentaires dans le sens où la résistivité de la méthode électrique varie en fonction de la quantité d'eau du sous sol et cette quantité d'eau varie en fonction de la nature du sous - sol et de la vitesse de propagation des ondes sismiques. La sismique réfraction est plus utilisée pour les gisements de roches massives.

#### a) La cartographie acoustique

La cartographie acoustique est basée sur la propagation des ondes acoustiques. Elle nous renseigne sur la profondeur d'eau pour les sites d'extraction en milieu aquatique. Ces cartes bathymétriques obtenues permettent un suivi relatif du gisement et le contrôle par rapport aux contraintes environnementales.

On distingue deux types de sondeurs acoustiques qui se différencient par les fréquences utilisées, le nombre de faisceaux acoustiques et la largeur des faisceaux.

##### i. Les sondeurs acoustiques mono faisceaux.

Le sondeur émet un signal acoustique avec un transducteur à large fond (>30°). Le signal de retour est réceptionné par le même transducteur. Ce système utilise le début de l'enveloppe de l'écho de fond pour positionner le fond.

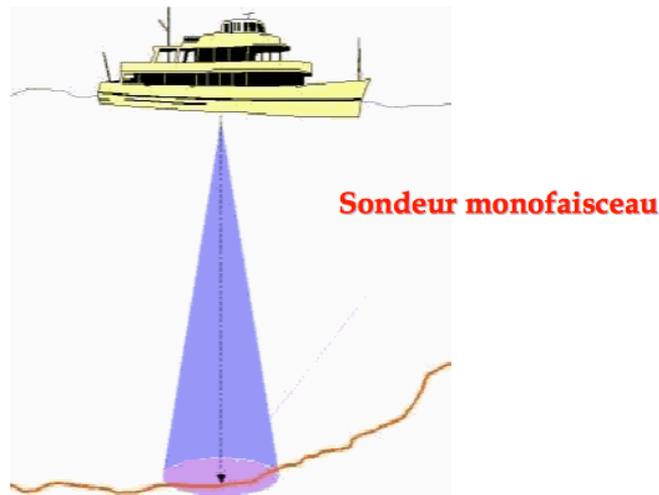


Figure 27: Principe d'un sondeur monofaisceau  
[http://flotte.ifremer.fr/content/download/5143/114665/version/1/file/3\\_intechmer\\_monofaisceau.pdf](http://flotte.ifremer.fr/content/download/5143/114665/version/1/file/3_intechmer_monofaisceau.pdf)

Le calcul de la profondeur répond à l'équation suivante :

$$P = \frac{C \times dt}{2}$$

Avec

$P$  = distance entre le sondeur et le fond ( m )

$C$  = Vitesse du son dans l'eau ( m.s )

$Dt$  = Durée entre l'émission et la réception du signal ( s )

Les fréquences, qui varient entre 12 et 200kHz, sont choisies en fonction des zones d'études. (Tableau 3).

Il est important de savoir que la fréquence est proportionnelle à la portée et la résolution : plus la fréquence augmente, plus la résolution diminue, plus la portée est faible. En d'autres termes, les cartes bathymétriques obtenues avec les hautes fréquences ont une résolution moins importante que celles obtenues avec les basses fréquences.

Sondeurs	Plage de profondeur	Fréquence	Type de levé
Grands fonds	100 - 12000 m	10 - 15 kHz	Talus, dorsale, plaine abyssale, lac
Moyens fonds	30 - 3000 m	30 - 50 KHz	Plateau, talus
Petits fonds	5 à 500 m	80 - 120 KHz	Plateau continental
Très petits fonds	0 à 100 m	200 à 400 kHz	Zones littorales.

Tableau 3: Les fréquences et les zones d'étude

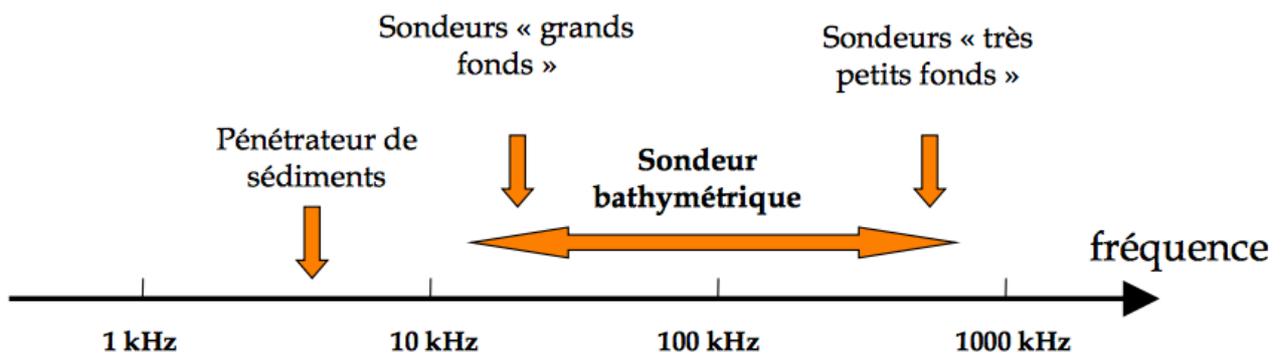


Figure 28: les fréquences et leur domaine d'utilisation.

[http://flotte.ifremer.fr/content/download/5143/114665/version/1/file/3\\_intechmer\\_monofaisceau.pdf](http://flotte.ifremer.fr/content/download/5143/114665/version/1/file/3_intechmer_monofaisceau.pdf)

*ii. Les sondeurs acoustiques multifaisceaux*

Les sondeurs multifaisceaux utilisent le même principe que les sondeurs mono faisceaux. La différence réside dans la réception des signaux retour. Pour ces sondeurs, les signaux retour sont enregistrés par une série de récepteurs placés perpendiculairement au navire. Ils permettent un meilleur enregistrement des données en incluant les détails que ne peut observer un seul faisceau. Plus la résolution de ces faisceaux est élevée, plus étroits sont les faisceaux.

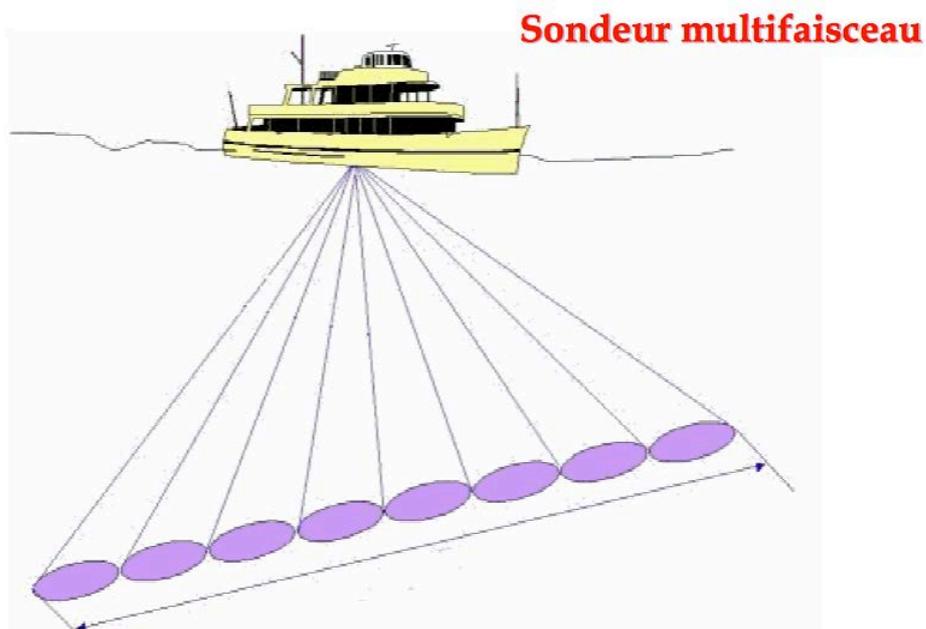


Figure 29: principe d'un sondeur multifaisceau

[http://flotte.ifremer.fr/content/download/5143/114665/version/1/file/3\\_intechmer\\_monofaisceau.pdf](http://flotte.ifremer.fr/content/download/5143/114665/version/1/file/3_intechmer_monofaisceau.pdf)

#### IV. CADRE GENREAL DES SITES D'ETUDES

L'objectif du projet de GEOFALCO est de répondre à la problématique du suivi de gisements meubles dans les carrières en eau. L'objectif du laboratoire GEODE est de comprendre la

dynamique sédimentaire d'un lac de gravière suite à une exploitation de granulats sachant que les lacs gravières ont été très peu étudiés.

Des sites de référence ont été choisis pour permettre l'étude des principaux cas de figures : site en paléolac situé en amont de moraine, site situé sur une terrasse fluviale en aval de moraine.

## 1. PIEDMONT DES PYRENEES FRANÇAISES.

### a) Lac-gravière de Loures-Barousse

La commune de Loures-Barousse est localisée à l'Est du département des Hautes-Pyrénées, en région d'Occitanie. Elle est située dans le piedmont de la chaîne pyrénéenne à 400 m d'altitude. Avec sa proximité à la chaîne pyrénéenne et au fleuve de la Garonne, Elle est fortement influencée par la fonte des neiges et les comportements de la Garonne. En 2013, la hausse du niveau de la Garonne, provoquée par une forte accumulation de la neige et une forte pluie, a causé l'inondation de la commune qui a déposé des sédiments dans le lac.

Géologiquement, la commune se localise dans la vallée de la Garonne formé pendant la dernière période glaciaire. Cette vallée glaciaire a ensuite été un lac qui s'est comblé progressivement par les sédiments postglaciaires. Les études gravimétriques menées par des scientifiques ont permis d'estimer l'épaisseur des sédiments postglaciaires à 230 m (Perrouy et al., 2015). La commune repose sur les sédiments alluvionnaires qui sont au sommet de cette séquence.

Le lac-gravière de Loures-Barousse se situe à l'est de la commune à la frontière avec le département de la Haute-Garonne. Il mesure 186m de long sur 135m de large. Localisé dans le lit majeur de la Garonne et en amont d'un front morainique, ce lac gravière artificiel est le résultat de l'extraction de granulats.

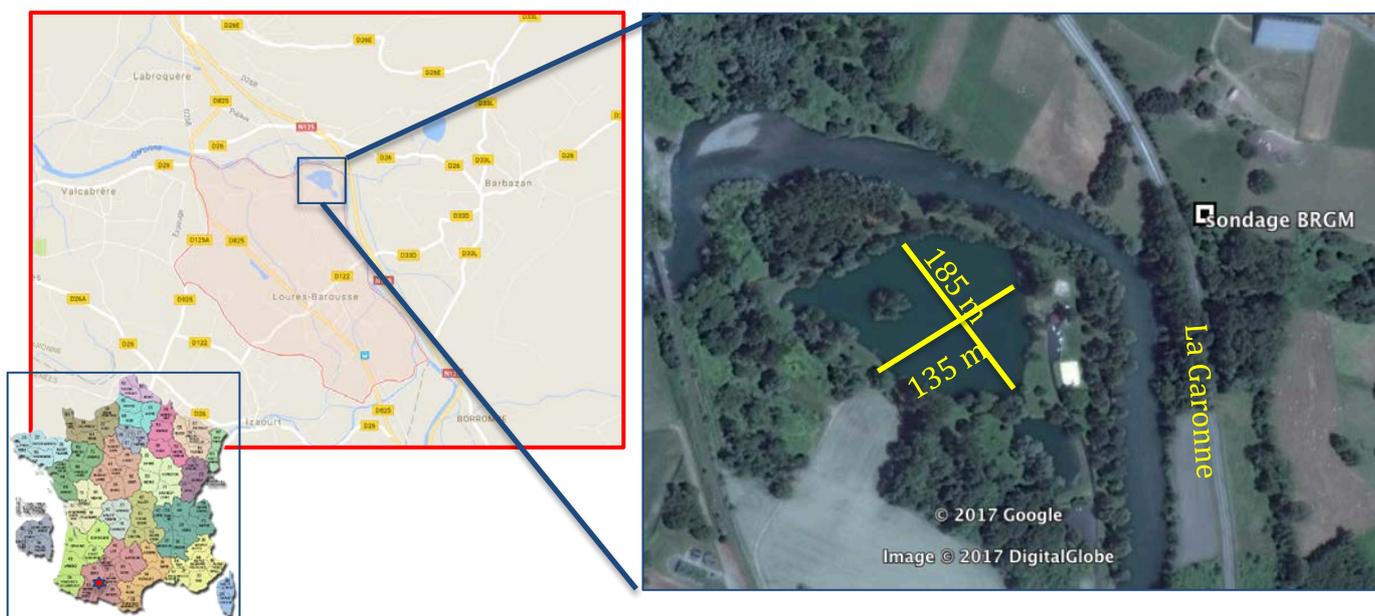


Figure 30: Localisation du lac de Loures-Barousse (Source: Google Earth)

## b) Carrière de Miramont-de-Comminges

La commune de Miramont-de-Comminges est située dans le département de la Haute Garonne. Il est situé à 400m d'altitude en aval des moraines frontales de la Garonne. Sa géologie se compose de sédiments alluvionnaires (FY) de la basse terrasse fluviale de la Garonne. Traversé par la Garonne, cette commune concentre une forte activité d'extraction de granulat dans laquelle s'inscrit la carrière de Dragage Garonnais. En aval de moraine, ce site en cours d'exploitation extrait des granulats alluvionnaires déposés par la Garonne. Le site d'extraction est subdivisé en 2 parties : la partie d'extraction terrestre et la partie en eau.. La partie en eau sur laquelle se feront les études mesure 113m de long sur 30m de large.

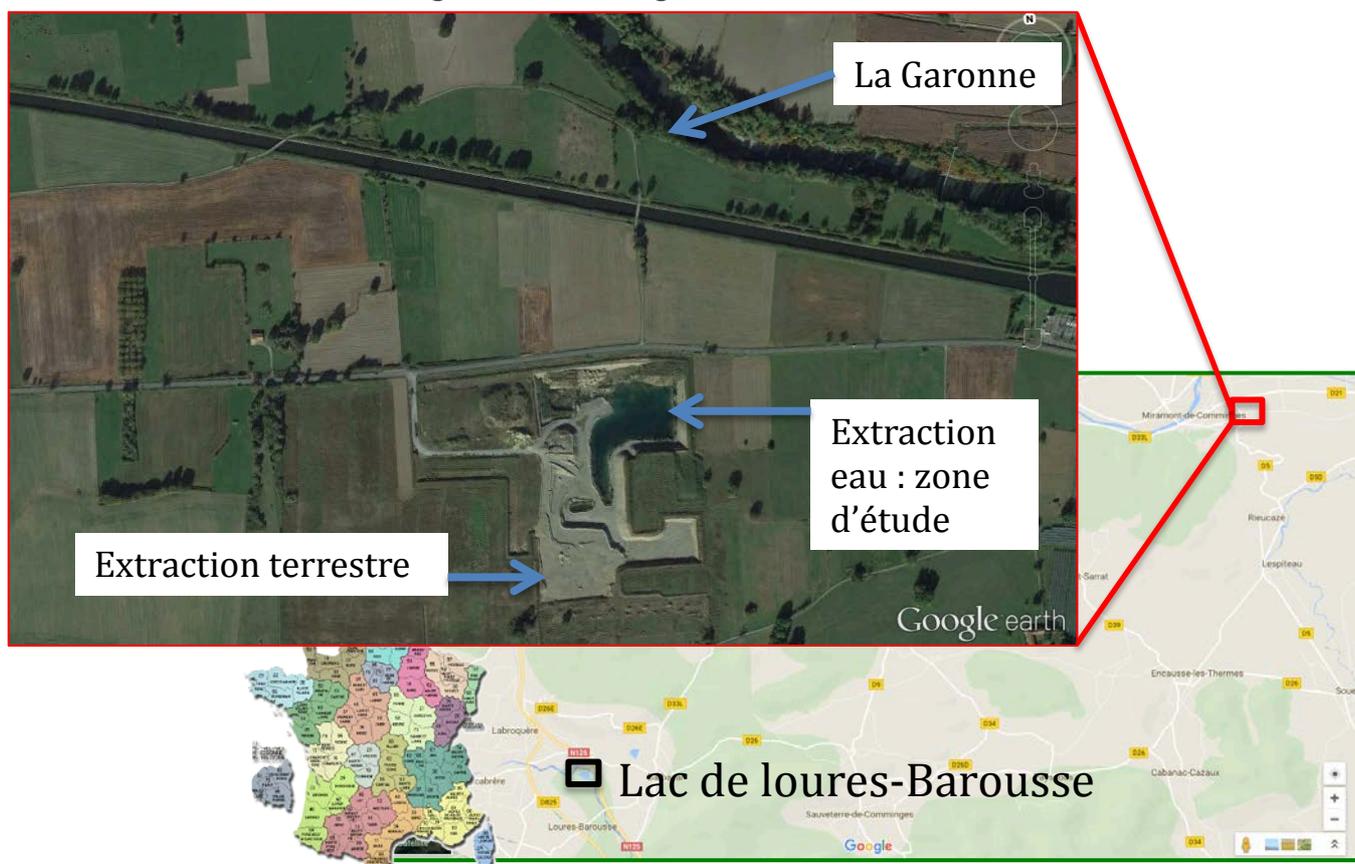


Figure 31: Localisation du lac de Miramont-de-Comminges

## c) Le lac de la Ramée.

Le lac de la Ramée se situe dans la périphérie de Toulouse. Situé sur la terrasse fluviale T3 de la Garonne, il était exploité pour des gisements de granulats. Son socle géologique est composé de sédiments quaternaires. La formation du lac est due à la montée du niveau de la nappe phréatique lors de l'extraction. Il sert actuellement de base de loisirs.



**Figure 32 : Localisation du lac de la Ramée (Google Earth)**

## **2. Le sillon alpin : le site d'exploitation de Froges.**

La commune de Froges se situe dans le département de l'Isère en région Auvergne Rhone-Alpes. Elle se situe dans le sillon alpin qui s'étend d'Albertville à Grenoble. Ce sillon alpin été le témoin d'une forte activité glaciaire qui a formé la vallée du Gresivaudan suite au retrait du Glacier de l'Isère. Celle ci est devenu un lac et s'est ensuite comblé grâce à l'apport sédimentaire des rivières alpines. Selon le forage de Domène, la commune repose sur une épaisseur de 530 m de sédiments post glaciaires. De bas en haut cette séquence sédimentaire est constituée d'alluvions lacustres postglaciaires surmontées par des alluvions fluviales déposées par l'Isère. Ces alluvions fluviales représentent les principaux gisements roches meubles exploités dans la région par plusieurs carrières dont les carrières du Grésivaudan.

Les carrières du Grésivaudan possèdent plusieurs sites d'extraction dont celui des Champs-près-Froges. Cette carrière sur laquelle se sont effectuée les tests, a un permis d'exploitation de 30 ans qui a débuté en 1996. Elle a une superficie de 38ha et une profondeur maximale de 15m.

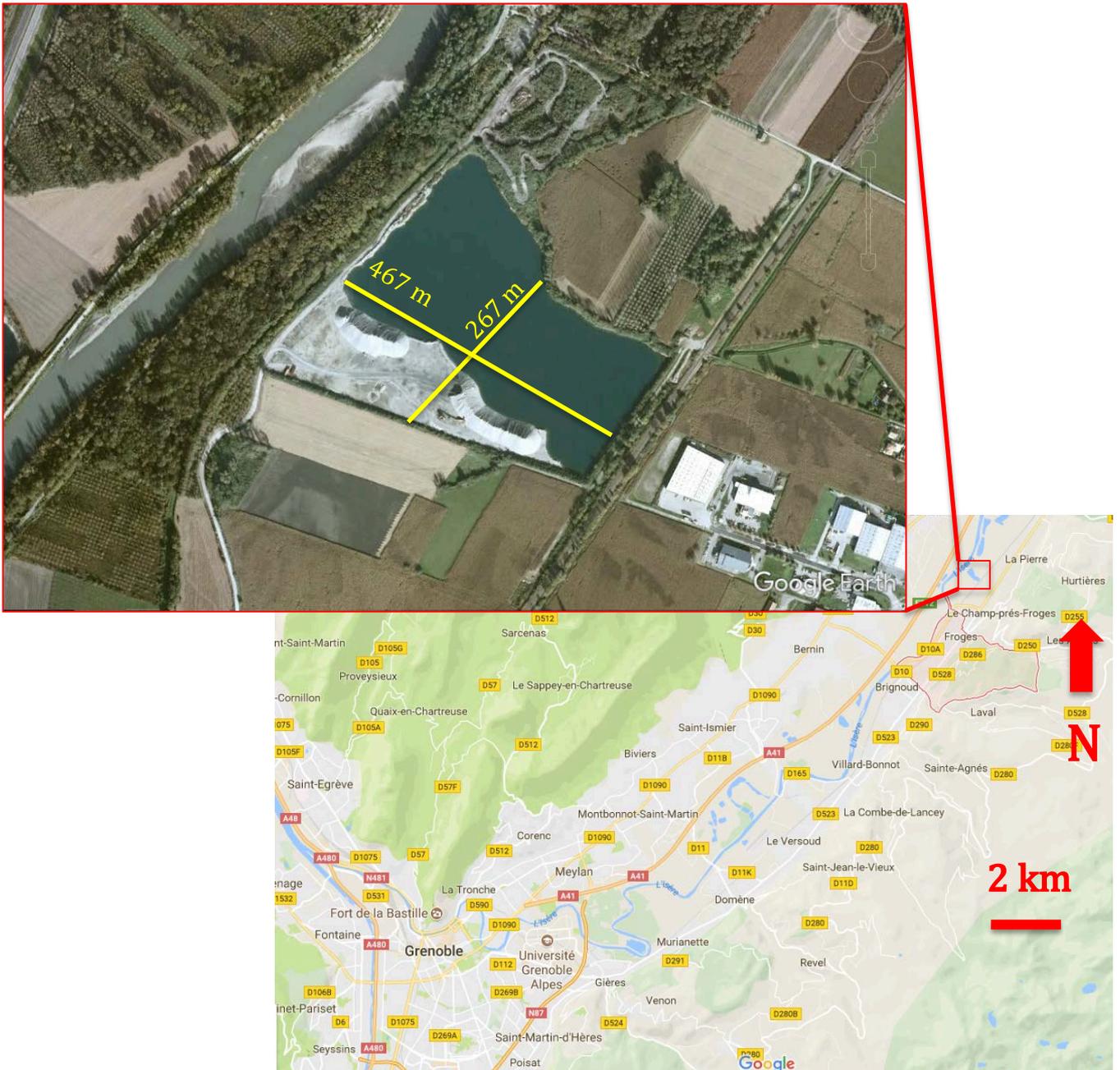


Figure 33: Localisation de la carrière de Champs-près-Frogès.

## V. Les méthodologies.

### 1. la sismique réflexion

La sismique réflexion permet de visualiser la topographie et la morphologie des fonds grâce à la propagation des ondes. Son principe est basé sur la propagation des ondes acoustiques dans un milieu continu. Les vitesses de propagation dépendent des conditions du milieu et des caractéristiques des formations traversées. (Fig.34)

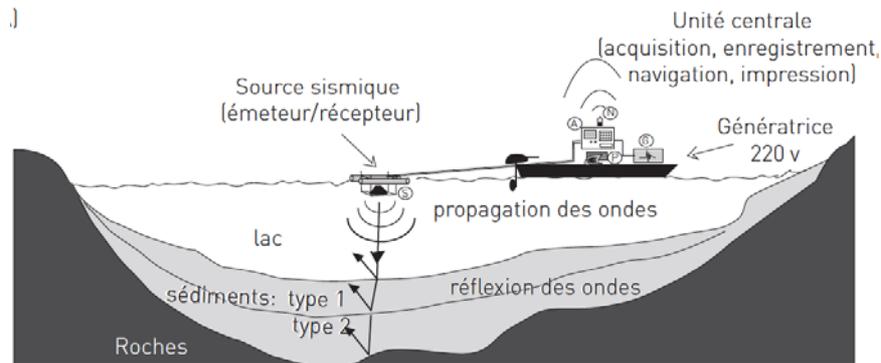


Figure 34 : (A) Principe de la cartographie réflexion de type Chirp (Chapron et al., 2007) ; B- profil sismique d'une séquence sédimentaire du lac d'Orédon lors de mon stage de 2016 à Geode

Les ondes émises parcourent la colonne d'eau et se réfléchissent à chaque contraste d'impédance acoustique qui correspond au produit de la densité du matériau par la vitesse de propagation des ondes. Ces contrastes d'impédance révèlent les hétérogénéités sédimentaires et s'observent sur les images sismiques par les unités acoustiques. La profondeur **P** de ces réflecteurs est calculée avec une loi de vitesse (1).

$$1) P = \frac{TWT (s)}{2 \times Vp (m.s^{-1})}$$

**P** = profondeur des réflecteurs en m

**TWT** = Temps double correspondant au trajet Aller et retour parcouru par l'onde

**Vp** = Vitesse de l'onde P (1450m.s dans les eaux douces et 1500m.s dans les sédiments)

Lors de cette campagne, un appareil de sismique réflexion KNUDSEN™ émetteur récepteur de type « Chirp » appartenant au laboratoire GEODE de l'université de Toulouse Jean Jaurès, a été utilisé avec des fréquences différentes (4, 14 et 200kHz). Les hautes fréquences 4 et 14 kHz permettent d'observer la première dizaine de mètres de sédiments avec précision. La faible fréquence 200kHz servait à déterminer le fond du lac pour produire la carte bathymétrique. Le KNUDSEN™ fonctionnait avec un ordinateur qui permettait d'observer en temps réel l'acquisition sismique du lac. Il était couplé à un GPS conventionnel de marque GARMIN qui nous orientait pour la navigation. L'ensemble de ce dispositif était transporté par un zodiac propulsé par un moteur électrique.

Les profils obtenus à partir du Knudsen™ sont générés en format SEG-Y qui seront importés dans le logiciel KINGDOM Suite ou le logiciel EDIFY SEG-Y en développement au laboratoire GEODE.

L'importation des profils dans KINGDOM nécessite de régler plusieurs paramètres :

- le système de coordonnées des profils sismiques (WGS 84) définit le système d'étude
- les résolutions verticales et horizontales et l'intensité de l'affichage des profils pour une meilleure observation
- les coordonnées de la zone (Shotpoint, X et Y).

Le logiciel KINGDOM™ Suite permet, par contre, d'ouvrir qu'une seule fréquence à la fois (4 ou 14 ou 200kHz).

L'importation des profils dans le logiciel EDIFI SEGY ne demande pas de modification des paramètres, les résolutions verticales et horizontales ainsi que l'intensité de l'affichage sont préalablement définis. Il permet de lire toutes les fréquences à la fois (4, 14 et 200 kHz). Il est plus simple mais moins précis dans le pointé des réflecteurs.

La figure 35 illustre un profil sismique du lac d'Orédon en Ariège étudié lors de mon stage de 2016. Ce profil a été interprété sur le logiciel EdifiSegy et permet de visualiser la progradation d'un delta. Il permet aussi d'établir une calibration de fréquences du Knudsen. En effet, l'unité 3 correspond à des sédiments plus fins lacustres que les unités 2 et 1.

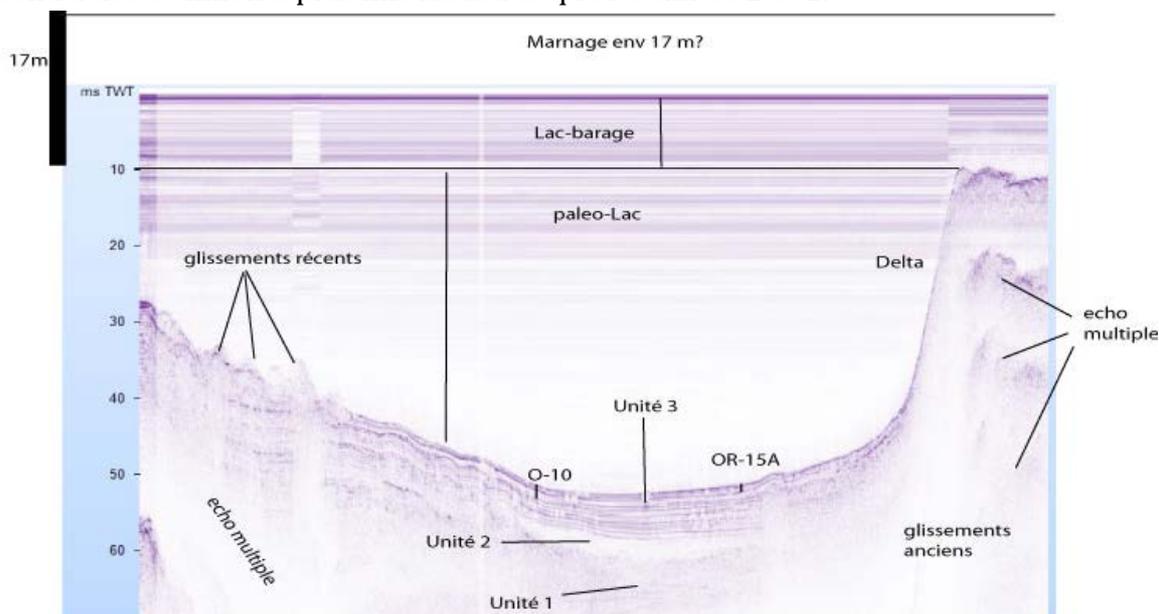


Figure 35: profil sismique d'une séquence sédimentaire du lac d'Orédon étudié lors de mon stage 2016 et interprété avec EDIFI-SEDY

Le logiciel EDIFI SEGY génère directement un Shape-file contenant les coordonnées X, Y et Z pour chaque horizon qui peut être directement utilisé dans ARCGIS. Chaque Shapefile correspond à un horizon pointé. Les profils obtenus avec une fréquence de 200 kHz sont utilisés pour générer des cartes bathymétriques en interpolant la profondeur Z des profils sur ARCGIS et GlobalMapper. Les cartes bathymétriques sont générées à partir de l'interpolation en fonction de la profondeur Z des lignes sismiques.

## 2. le géoradar,

Le géoradar est un appareil émetteur récepteur d'ondes électromagnétiques qui permet la cartographie du sous-sol sur une profondeur. Elle est équipée d'antennes de fréquences différentes qui sont utilisés en fonction de la zone d'étude, la profondeur d'investigation et de la résolution voulue. Les fréquences sont exprimées en MHz. Elles varient généralement entre 800 et 50 Mhz. Plus la fréquence est basse, plus la profondeur d'investigation est grande mais avec une faible résolution. Les hautes fréquences permettent d'avoir une cartographie à haute résolution du sol et de détecter des objets centimétriques. Le géoradar est beaucoup utilisée en génie civil pour la prospection du sol avant la construction de fondation. Dans les domaines scientifiques, elle est aussi utilisée pour la recherche en archéologie et pour l'étude des glaciers. En géologie, le géoradar permet de déterminer les couches géologiques de subsurface.

A Loures-Barousse, il a été utilisé avec les antennes de 100MHz blindées. A Miramont-de – Comminges, les antennes de 100MHz blindées et de 250MHz ont été associées pour une comparaison.

Le traitement des données a été effectué à l'université de Pau par les géophysiciens Guy Sénéchal et Dominique Rousset sur des logiciels spécifiques.

## VI. RESULTATS ET DISCUSSION

### 1. RESULTATS

#### a) Le sillon alpin

##### i. Le carrière des Champs-près-Froges

L'acquisition s'est déroulée le jeudi 29 juin 2017. Le site a été couvert partiellement en raison d'une mauvaise météo. Cette campagne a été sollicitée par le responsable de la carrière pour lui apporter des informations sur l'épaisseur des sédiments fins déposés dans son site en eau. Les résultats permettront également d'étudier la dynamique sédimentaire après l'exploitation et d'effectuer une comparaison avec les sites du piedmont pyrénéen.

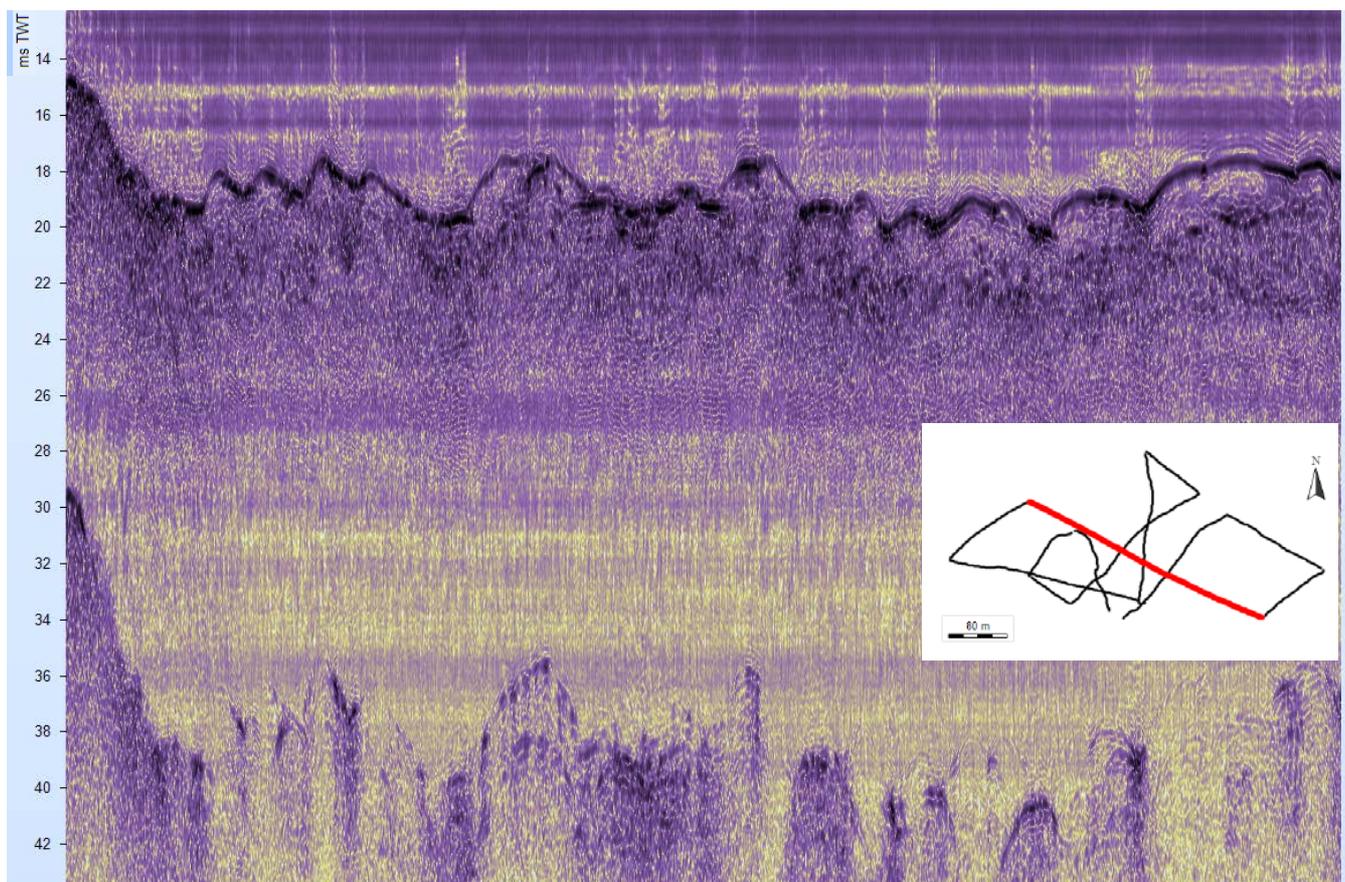


Figure 36: profil axial du lac

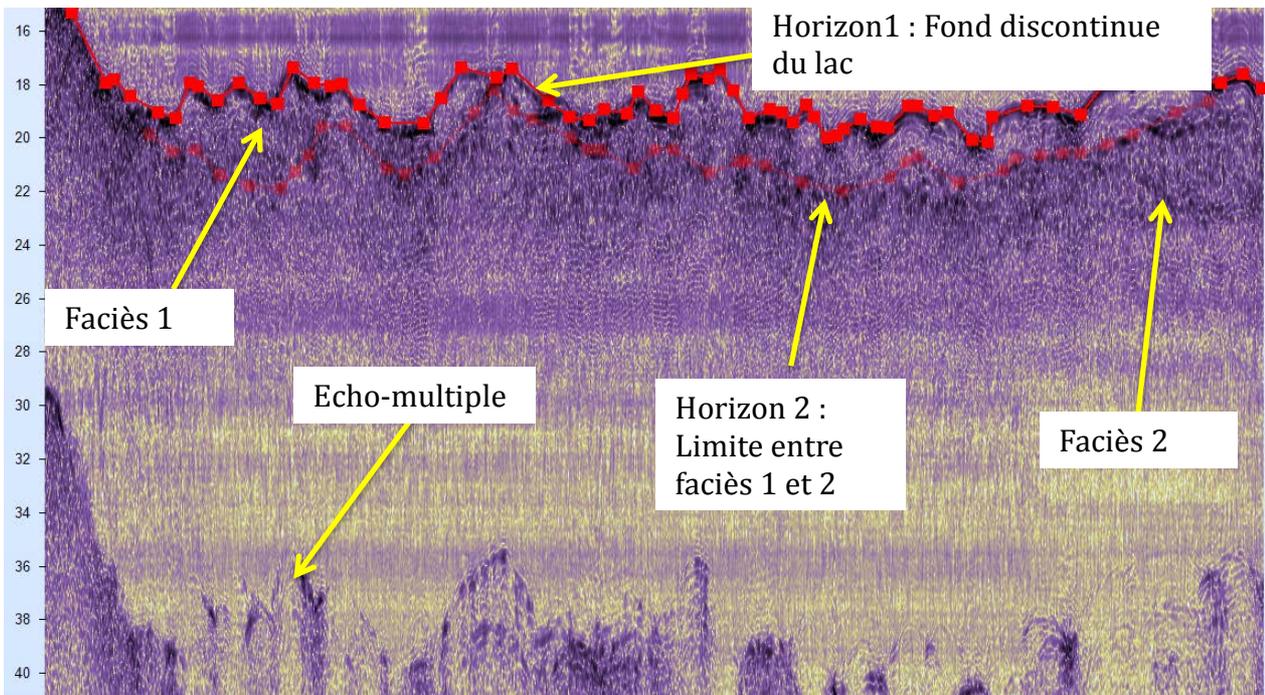


Figure 37: profil axial interprété

Une dizaine de profils 4kHz ont été prélevés.

Sur le profil axial, on observe :

- Un fond discontinu attribué à l'extraction de granulats
- Faciès 1 transparent
- Faciès 2 difficilement observable
- Les écho-multiple due à la diffraction des ondes acoustiques.

L'interprétation de l'ensemble des profils a permis de générer une carte bathymétrique. Pour avoir une carte bathymétrique plus précise, il faudrait à l'avenir avoir une meilleure densité de donnée en effectuant l'acquisition suivant un maillage plus fin de la zone. Les crêtes observées sur le fond témoignent de l'activité industrielle.

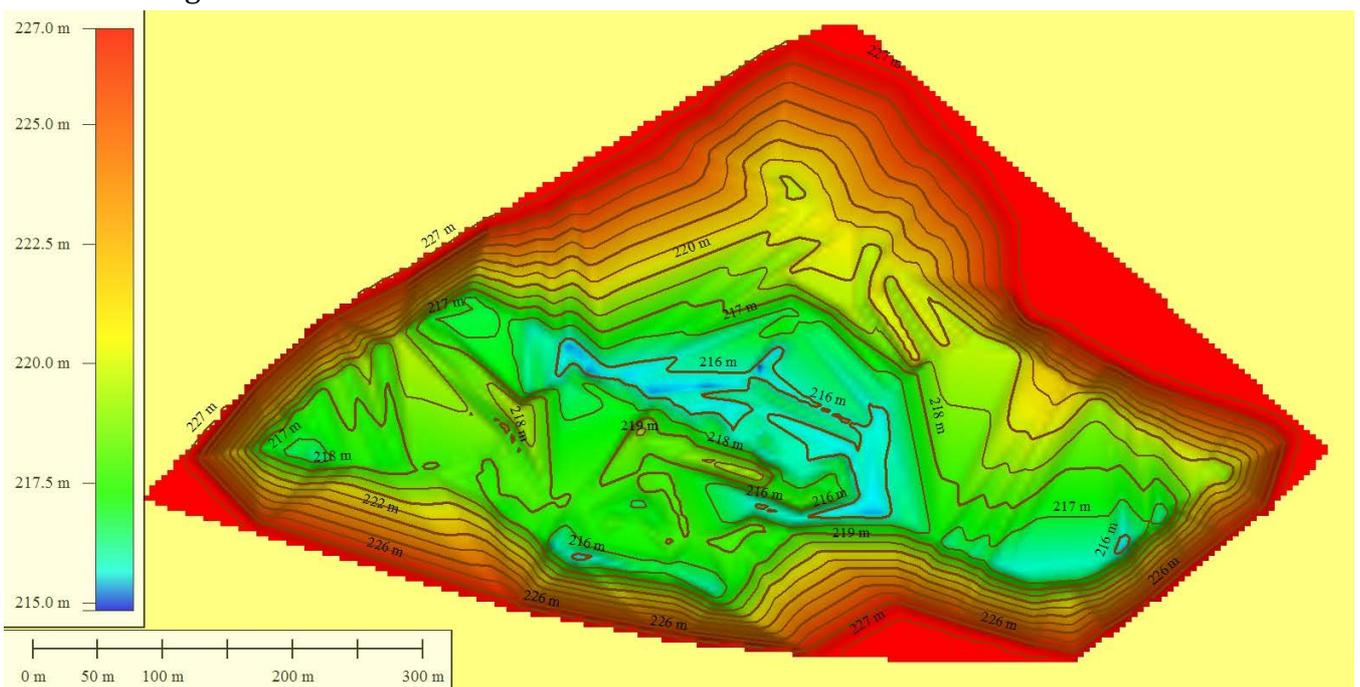


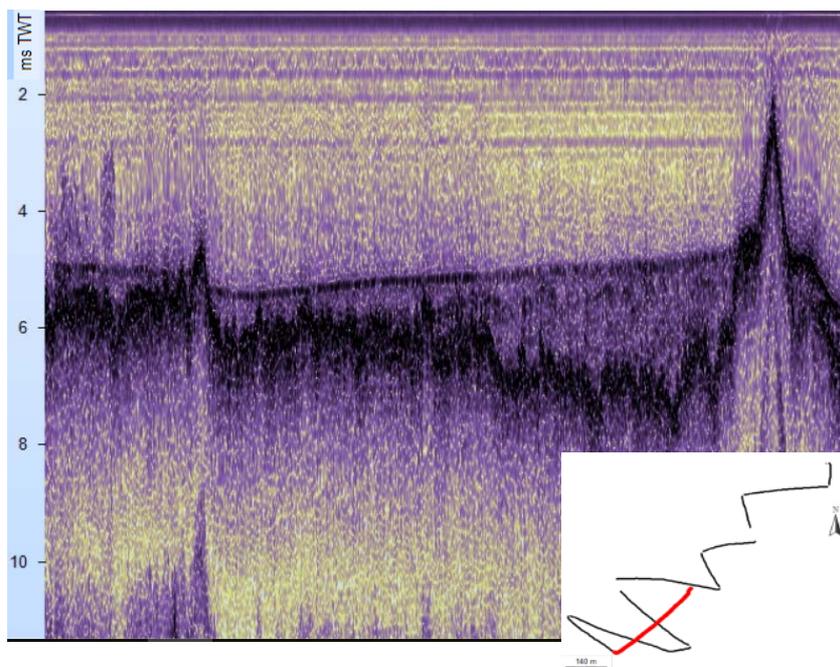
Figure 38: Carte bathymétrique générée sur GlobalMapper

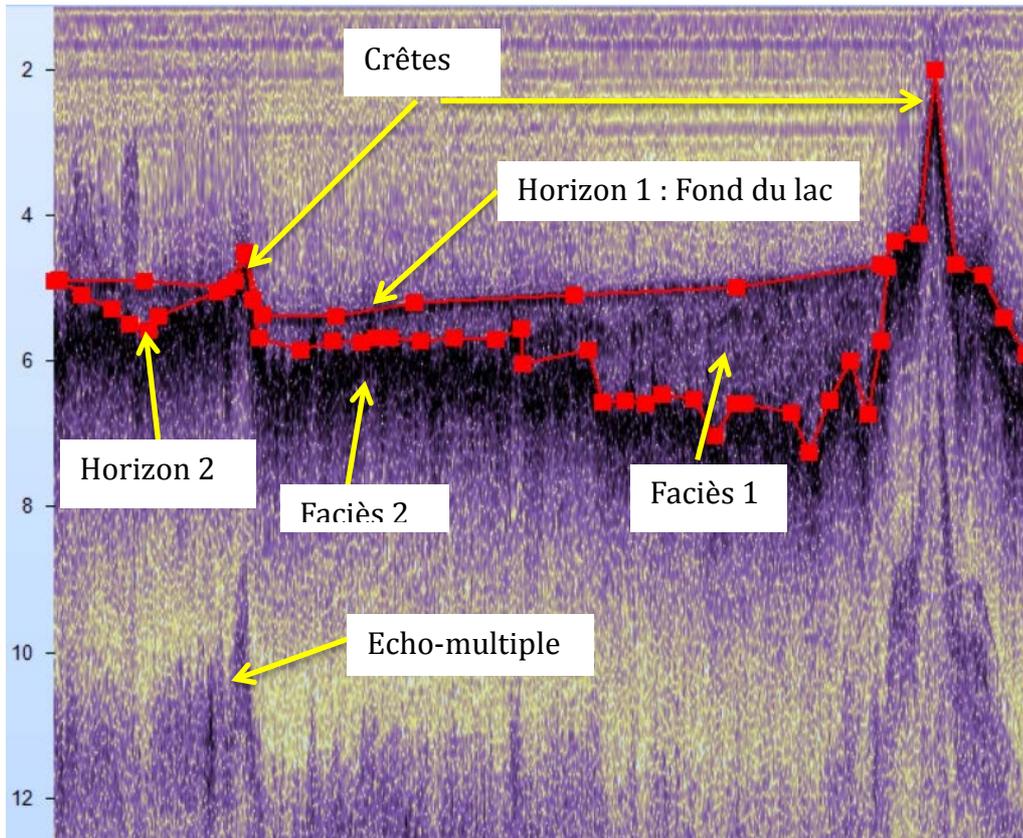
La faible différence entre les faciès 1 et 2 pourraient signifier qu'il s'agit d'une même formation géologique avec une granulométrie différente. Le signal 4kHz a été rapidement absorbé. La fréquence 14kHz devrait permettre une meilleure visualisation. Aussi, la réalisation de carottages permettrait de préciser et de valider la présence de deux faciès.

## b) Le Piedmont des Pyrénées

### i. Le lac de la Ramée

Sur ce lac a été réalisé qu'une cartographie acoustique avec la fréquence 14kHz. Le lac de la Ramée était un ancien site d'extraction de granulat mais il est difficile de retrouver des archives historiques mentionnant son année d'exploitation. Cette cartographie avait pour but d'expliquer la dynamique sédimentaire post-extraction et identifier l'impact de cette extraction sur la géologie du lac. Cette campagne sismique a permis d'obtenir 10 profils sismiques qui couvrent partiellement le lac dans sa longueur.



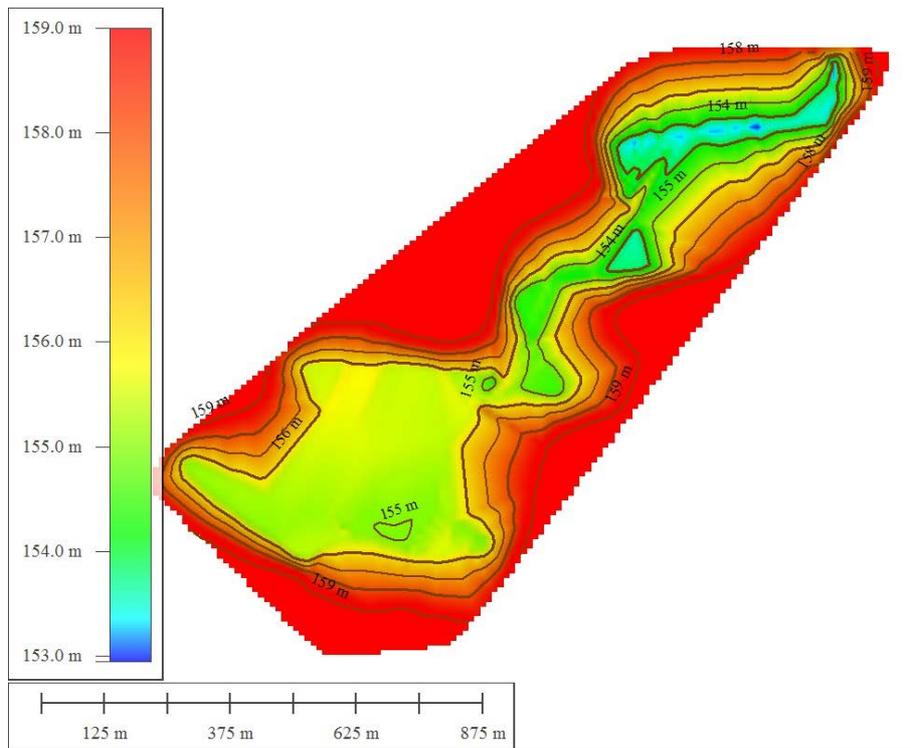


Sur le profil axial : on distingue :

- Des crêtes sur le fond du lac qui témoignent de l'activité industrielle
- un faciès transparent et homogène qui correspond à des sédiments fins. Son épaisseur varie entre 30 cm et 3m
- Un faciès irrégulier qui correspond à une formation différente plus grossière qu'on pourrait assimiler au substratum.

La dynamique de ce lac correspond à celui du lac de la carrière de Champs-près-Frogès avec, en plus, un remplissage sédimentaire postérieur à l'activité industrielle. Ces sédiments seraient dus à un apport extérieur de cours d'eau auxquelles il serait relié.

L'interpolation de ces profils sismique a permis de générer des cartes bathymétriques 2D et 3D.

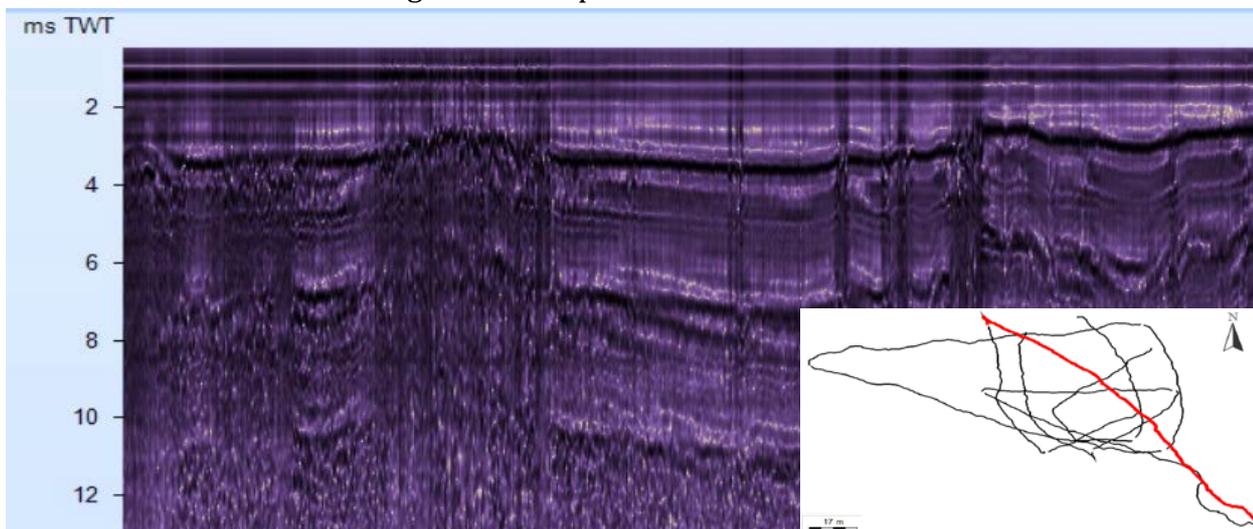


**Figure 39:** carte bathymétrique 3D générée sur GlobalMapper.

## ii. Le lac de Loures-Barousse

### ❖ La cartographie acoustique : sismique réflexion CHIRP (4kHz)

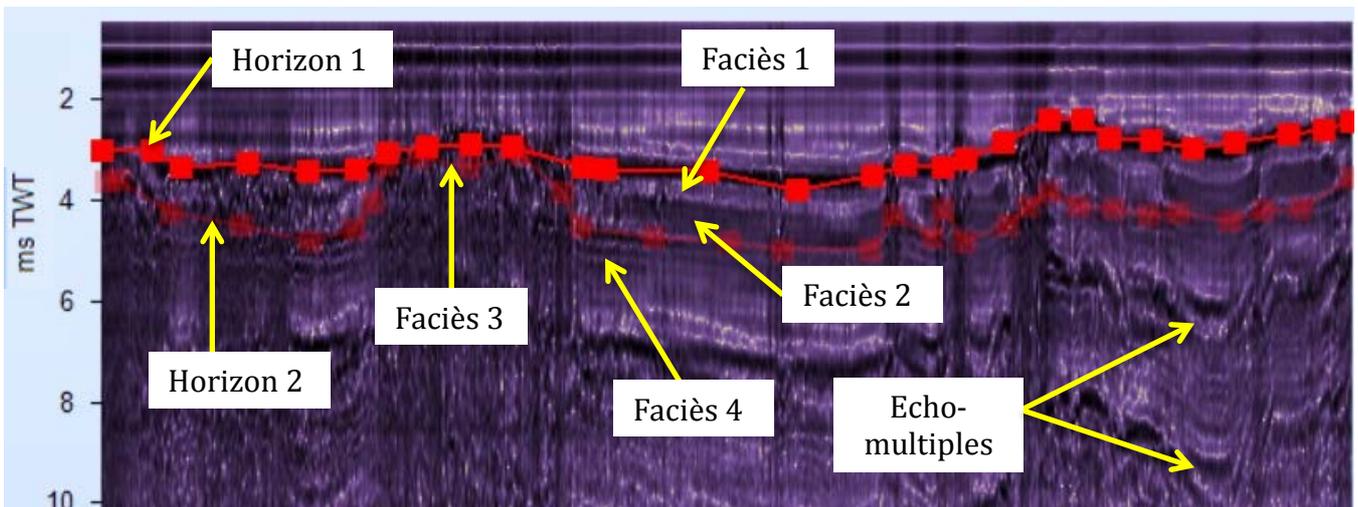
La campagne d'acquisition s'est déroulée le 4 Juillet 2017. Elle avait plusieurs objectifs : tout d'abord, obtenir une carte bathymétrique du lac, ensuite, déterminer l'épaisseur de sédiments alluvionnaires dans le fond du lac. Au vu de la petite taille du lac et de la météo ensoleillé, le lac a été couvert sur toute son étendue avec une grille sismique. Les profils sismiques obtenus à la fréquence 4kHz étaient de petites dimensions ce qui a rendu leurs observations et leurs traitements difficiles sur le logiciel d'interprétation EDIFI SEG Y.



**Figure 40:** profil axial du lac de Loures-Barousse.

Néanmoins, on arrive à déterminer 4 faciès sismiques sur les deux premiers mètres :

- L'horizon 1 qui correspond au fond du lac,
- Un faciès (1) transparent qui correspondrait à des sédiments fins massifs.
- Un faciès (2) bruité et de forte amplitude qui pourraient correspondre à des sédiments plus grossiers.
- Un horizon 2
- Un faciès (3) chaotique qui serait des sédiments plus grossiers que le faciès (2)
- Un faciès (4) lité et oblique.



Avec la mauvaise résolution des profils sismiques, il est difficile d'être plus précis lors de la description visuelle. Les faciès 1 et 2 correspondent à des dépôts sédimentaires

Sachant qu'en 2013, la commune a connu une inondation causée par la fonte de la neige et des fortes précipitations, les faciès (1) et (2) correspondraient à des dépôts sédimentaires post-crise de granulométrie différente. L'horizon (2), avec la présence de crêtes, serait alors le fond du lac après l'activité industrielle d'extraction. Le faciès (3) plus grossier, qui absorbe les 4kHz, serait sans doute les sédiments autre fois exploités lors de l'extraction. Enfin, il apparaît un faciès (4) lité et oblique qui ressemble à des dépôts sédimentaires d'une barre de méandre sachant que la Garonne est en méandre dans cette partie. Il serait judicieux de planifier des campagnes de carottages pour valider les faciès (2), (3) et (4).

Une carte bathymétrique a été produite grâce à l'interpolation des profils sismiques.

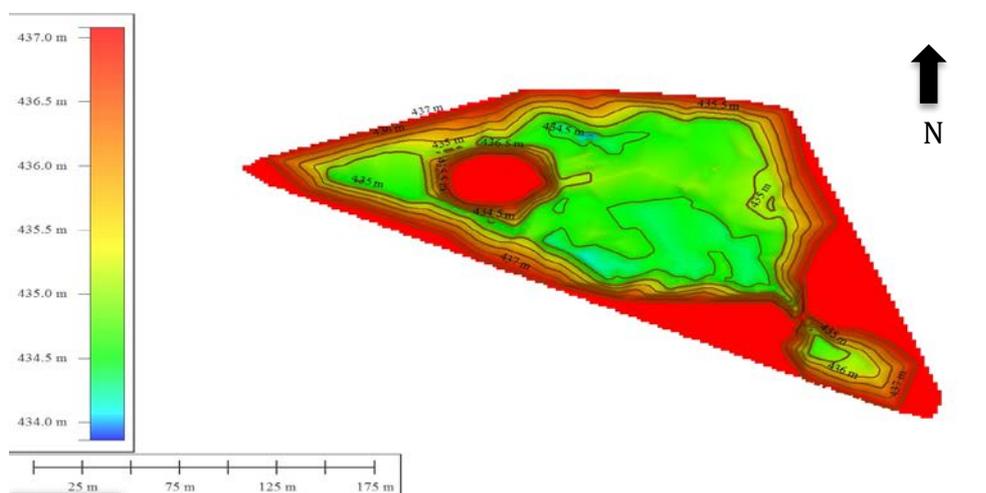


Figure 41: carte bathymétrique du lac de Loures-Barousse.

Le lac de Loures-Barousse est un lac artificiel qui résulte de l'extraction de granulats. Il est possible d'estimer le volume de matériaux extrait en combinant les données bathymétriques et les données topographiques obtenues par drone aérien mais utiliser que les données bathymétriques donneraient des résultats erronés..

#### ❖ Le géo-radar

Sa campagne d'acquisition, qui a suivi celle de la sismique réflexion, s'est déroulée dans la même journée. Elle a été réalisée avec les géophysiciens Guy Sénéchal et Dominique Rousset de l'université de Pau. Ils étaient équipés d'un géoradar de type MALA avec des antennes 100Mhz blindées et 250 Mhz non blindées.

Les objectifs de cette campagne étaient les suivants :

- Valider son utilisation en milieu aquatique, le géoradar étant généralement utilisé pour des études terrestres.
- Comparer les données avec celles de la sismique réflexion pour trouver des complémentarités.
- Pallier les limites de la sismique réflexion concernant la profondeur d'investigation qui est fonction de la granulométrie de la formation géologique.

Plusieurs verrous extérieurs peuvent limiter l'utilisation du géoradar :

- la présence de matières en fer qui provoque des interférences,
- la conductibilité de l'eau qui peut absorber l'onde électromagnétique.

Tout d'abord, Il a fallu plusieurs tests à la fois, sur un bateau de pêche et un zodiac pour trouver l'embarcation adéquate pour l'acquisition. Ensuite, le lac a été quadrillé de manière aléatoire à bord du Zodiac avec des antennes 100MHz blindées pour calibrer les paramètres d'acquisition pour une bonne réponse du géoradar. Le dysfonctionnement du GPS nous a empêché de géoreferencer toutes les lignes d'acquisition. Au total, sur une dizaine de profil, un seul a pu être géoreferencé. Néanmoins, tous les profils ont été utilisés pour étudier l'imagerie obtenue par le géoradar en milieu aquatique. Le rapport de mission des géophysiciens Guy SENECHAL et Dominique ROUSSET de l'université de Pau explique les traitements effectués sur les profils pour ressortir et les calculs effectués, en utilisant la vitesse de l'onde électromagnétique dans l'eau, pour estimer les profondeurs.

En observant la ligne 8 géoreferencé parallèle à la ligne sismique présenté plus haut : on distingue les faciès (1), (2) et (4) de la profil axial sismique ainsi que les horizons (1) et (2).

Les deux hyperboles illustrent la présence de câbles d'accro-branche situés au dessus du lac.

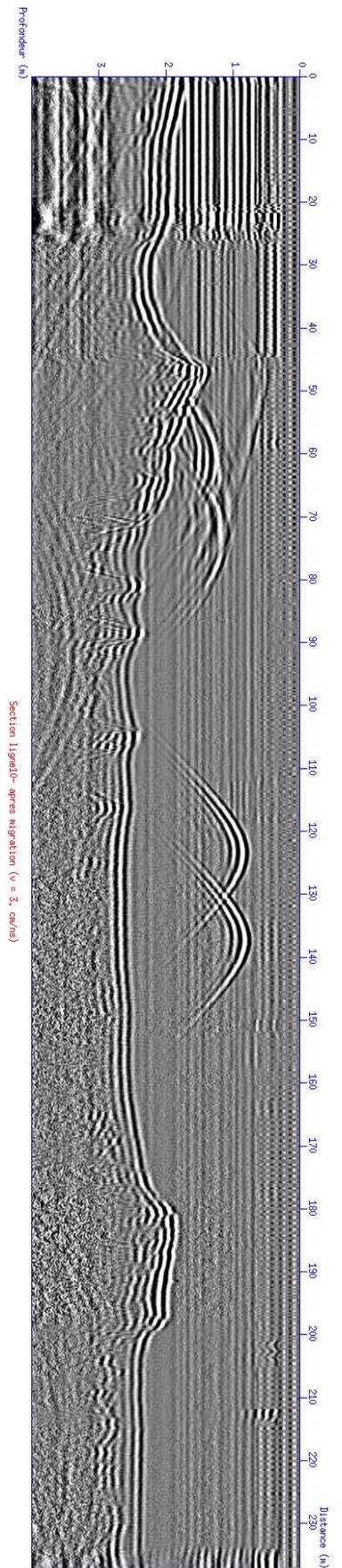


Figure 43: Profil géoradar 100Mhz blindés

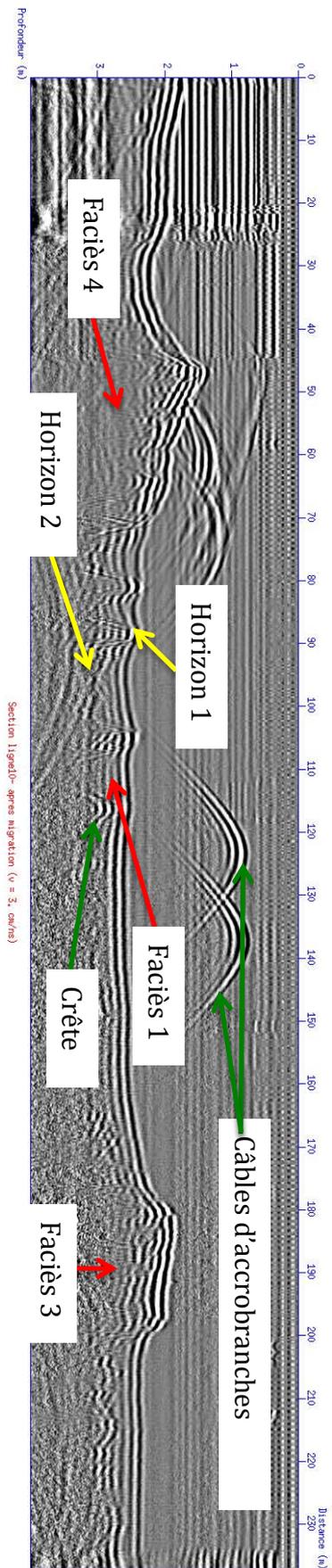
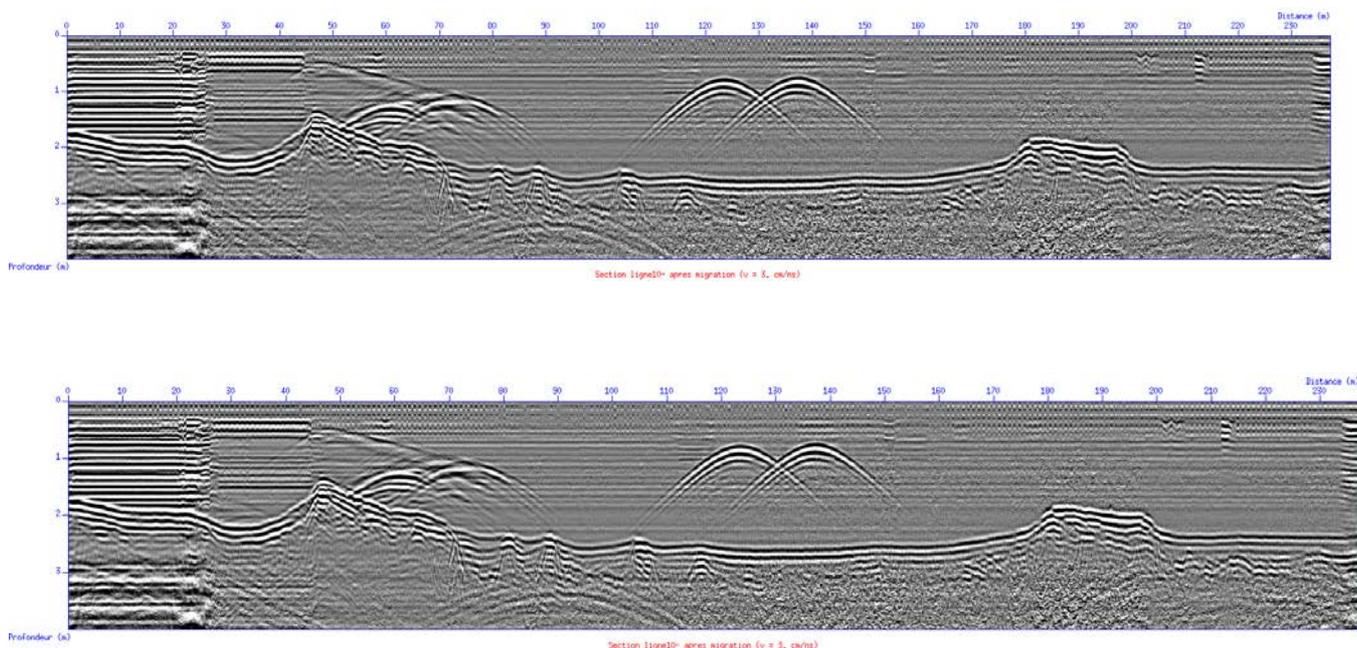


Figure 42: profil interprété 100Mhz blindés

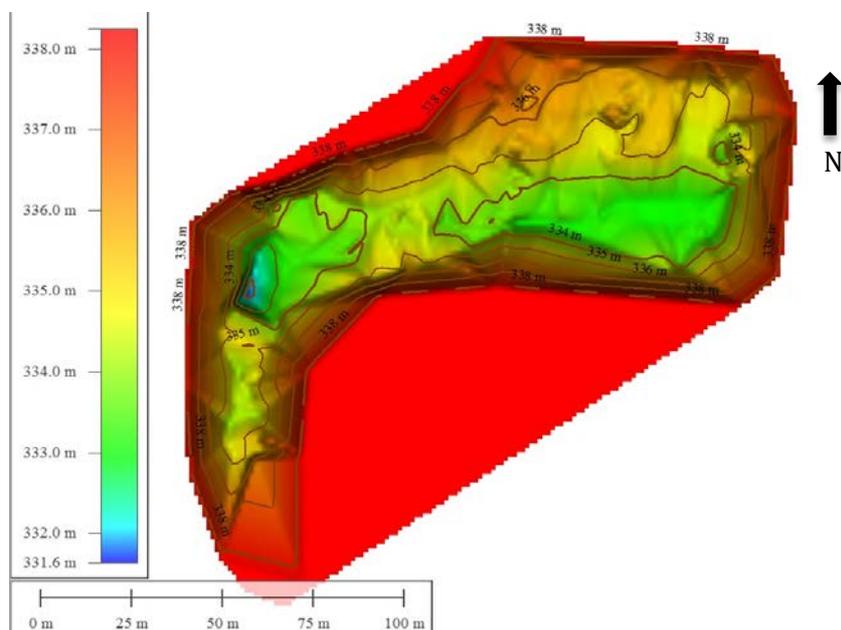
Un autre profil avec des antennes 100MHZ non blindées a été effectué pour une comparaison. Le rapport signal / bruit est meilleur sur ce profil, le blindage aurait tendance à atténuer la puissance de l'antenne de 100MHZ blindés. On retrouve les mêmes structures avec une meilleure résolution.



### iii. Lac de Miramont-de-Comminges

Cartographie acoustique : sismique réflexion (14 kHz)

La campagne s'est déroulée dans la matinée du 5 juillet 2017 sous une bonne météo. Le dispositif était le même que celui utilisé sur le site de Loures-Barousse. A la différence du site de Loures-Barousse, ce site est toujours en exploitation. Selon les informations recueillies auprès du responsable de carrière, il y aurait la présence d'argile et des sédiments alluvionnaires à certains endroits. L'objectif était d'arriver à cartographier ces formations géologiques et à confirmer la profondeur communiquée par le responsable de carrière.



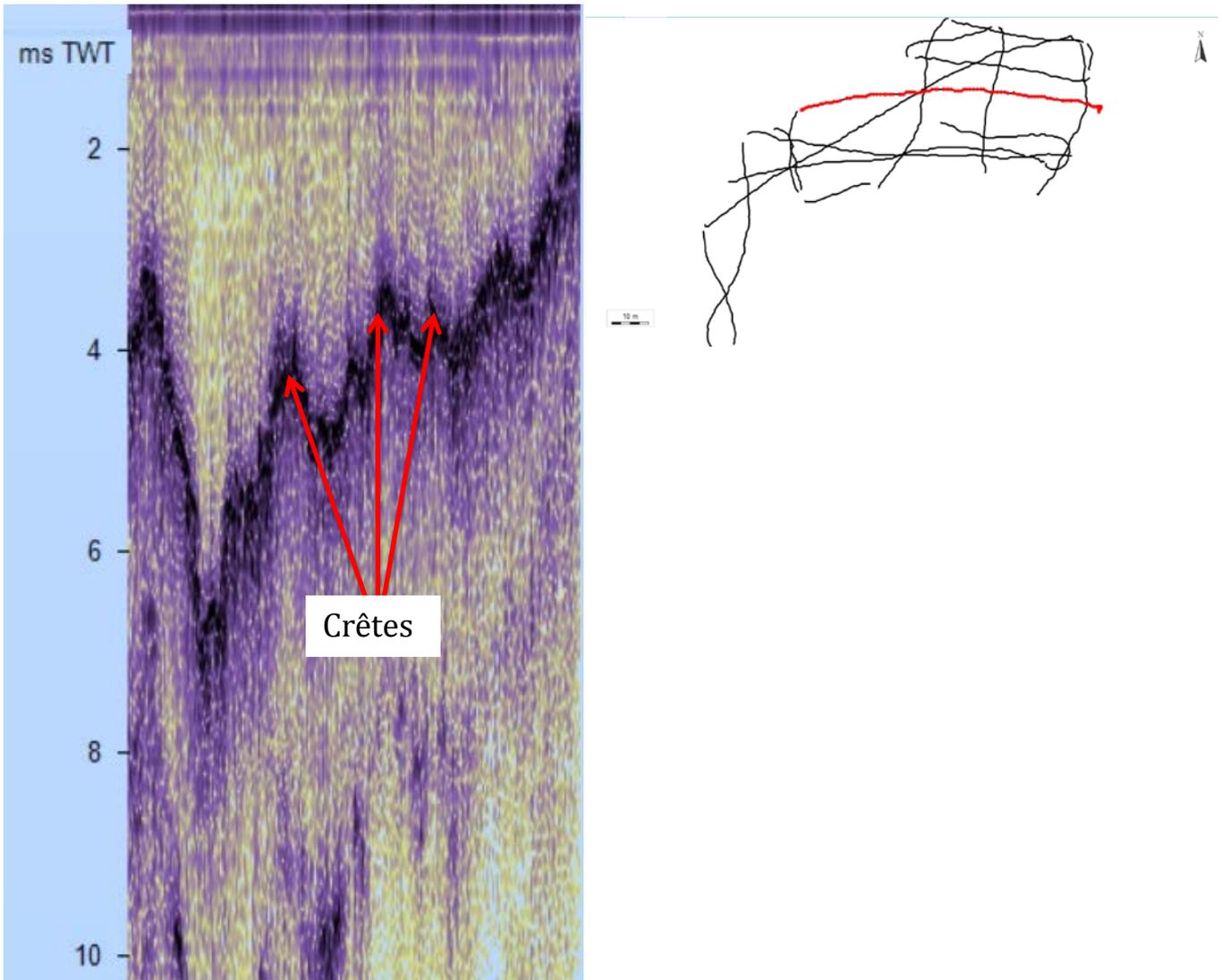


Figure 44: profil sismique 14kHz axial

Au vu de la taille du site d'extraction en eau, on a rencontré les mêmes problèmes que sur le site de Loures-Barousse : profils sismiques de petite dimension difficile à étudier sur le logiciel d'interprétation EDIFI-SEGy. Néanmoins, une carte bathymétrique générée sur GLOBAL MAPPER a permis de confirmer la profondeur. La modélisation 3D de la carte bathymétrique permet de se rendre compte de l'impact de l'extraction sur le fond du lac.

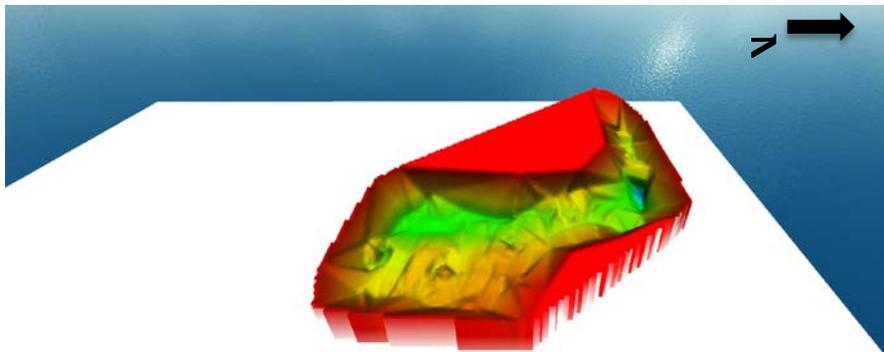
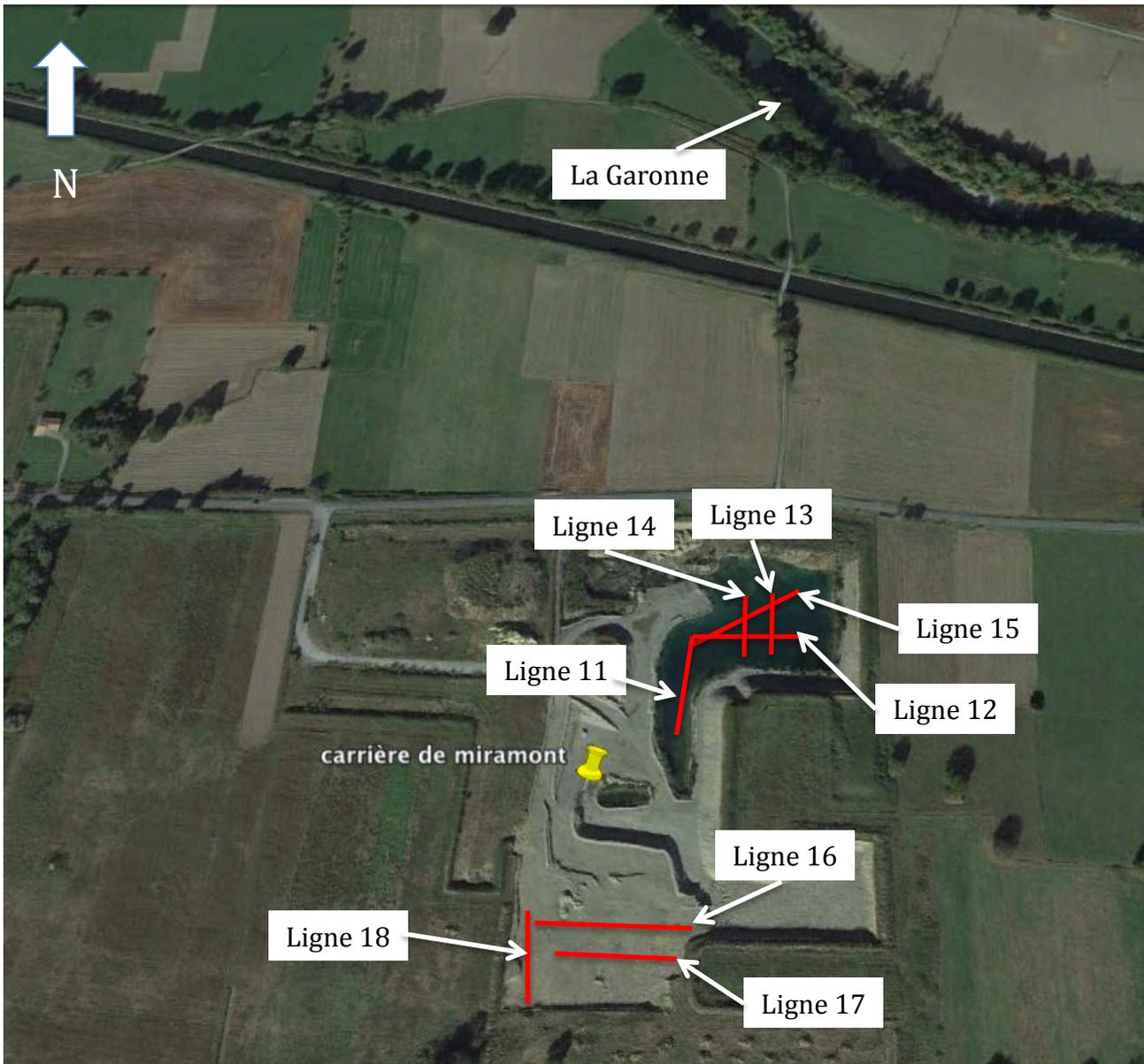


Figure 45: carte bathymétrique réalisée sur Global Mapper

- Le géoradar en milieu terrestre.

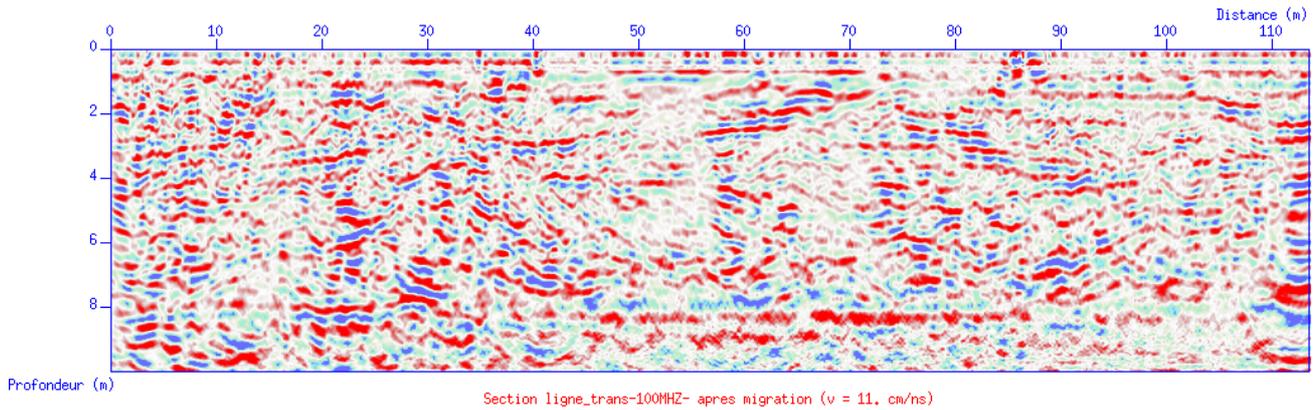
Le site est constitué de deux parties : une partie terrestre et une partie en eau. Cette acquisition a été réalisée simultanément avec la sismique réflexion. L'objectif était de réaliser une cartographie du sous-sol qui sera ensuite validé avec le front de taille visible de l'extraction.



Cette campagne a permis d'obtenir :

- 3 profils avec les antennes 100MHz blindées. (ligne 16, 17 et 18)
- 1 profils avec les antennes 250 MHz blindées. (ligne 16)

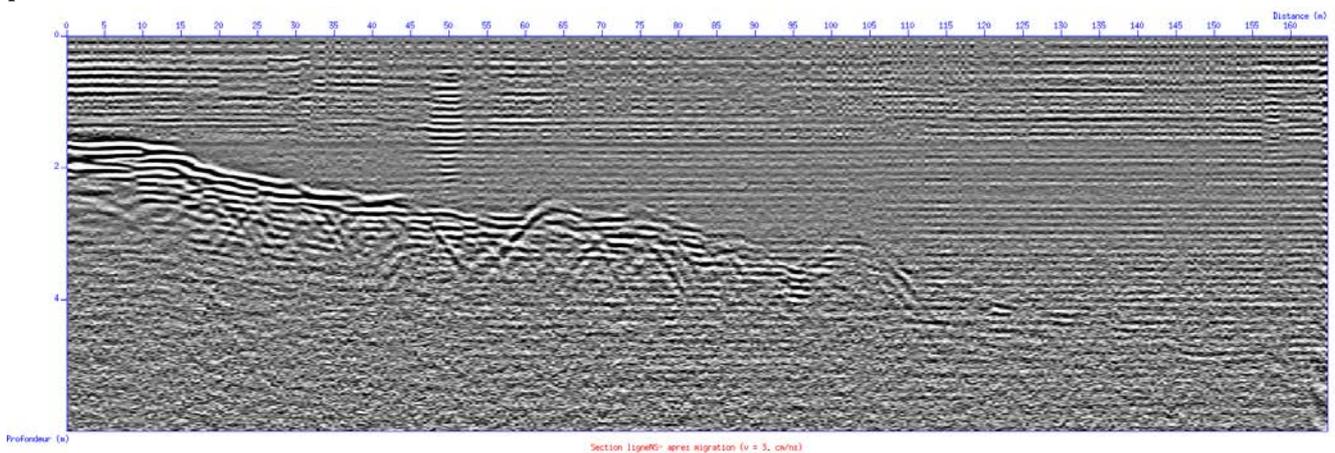
Un point milieu commun a également été prélevé. Il permet d'estimer la vitesse de propagation des ondes EM dans le sous-sol à 11cm/s. cette vitesse a été utilisée pour les conversions des profondeurs observées sur les profils. L'interprétation des profils géoradar requiert une certaine connaissance scientifique. Selon les géophysiciens de Pau, Les profils illustrent parfaitement le front de taille et pourraient être utilisé pour orienter l'extraction.



**Figure 46:** section radar ligne 16 (100 Mhz blindées)

❖ Le géoradar en milieu aquatique

5 profils (profils 11 à 15) ont été prélevés lors de cette campagne. Le dispositif était le même que celui utilisée pour le Lac de Loures-Barousse. L'objectif était de pouvoir observer les différences géologiques présent dans le fond du lac. Le rapport signal sur bruit était faible et pourrait expliquer une forte conductivité de l'eau qui absorbe les EM. Ce signal étant absorbé, il ne permet pas d'obtenir une imagerie illustrant le fond du lac hors mis l'interface eau – sédiment qui est présent à certains endroits.



**Figure 47:** profils 14 sens Nors Sud.

## VII. DISCUSSION

### 1. Les méthodes géophysiques et la granulométrie des sédiments

#### a) La sismique réflexion et la granulométrie des sédiments.

La sismique réflexion est décrite comme étant une méthode géophysique utilisant des ondes acoustiques pour cartographier les dépôts sédimentaires en milieu aquatique. Son utilisation nécessite d'avoir une profondeur d'eau suffisante pour la propagation des ondes et une granulométrie fine pour la pénétration des ondes acoustiques.

Les lacs de Loures-Barousse et de Miramont-de-Comminges avec une profondeur d'eau inférieure à 4m n'ont pas permis une bonne propagation des ondes ce qui pourrait expliquer la qualité de ces profils sismiques et la difficulté dans l'analyse sédimentaire.

Le lac de Champ-près-Frogès dans le sillon alpin, avec une profondeur de 15 m était idéal pour la sismique réflexion. Mais la granulométrie des sédiments ne permet pas de visualiser clairement les dépôts sédimentaires. Par contre le Lac de la Ramée a fourni de meilleurs résultats pour une

bathymétrie inférieure. Dans le cadre du projet RGF du BRGM, la campagne menée sur le lac d'Orédon a fourni d'excellents profils sismiques (Fig.35)

En essayant d'établir une échelle granulométrique des sédiments permettant de calibrer l'utilisation du KNUDSEN™ et de la sismique réflexion en général dans les lacs, il faudrait dans l'idéal avoir la granulométrie des sédiments du Lac d'Orédon ensuite du lac de la Ramée et enfin celui de Froges. Ces intervalles granulométriques permettront de définir l'utilisation de la sismique et d'anticiper les résultats. Pour la précision des granulométries, il faudrait effectuer de la granulométrie Laser sur les carottes sédimentaires des différents lacs.

#### **b) L'utilisation du géo-radar en milieu aquatique.**

Le géoradar a toujours été reconnu pour son utilité dans les travaux de génie civil pour cartographier les premiers mètres du sol avant d'effectuer des travaux. Elle donne également de meilleurs résultats dans les études scientifiques sur les glaciers. Elle a déjà été utilisée sur certains lacs et l'objectif de cette campagne était de confirmer son utilisation, de préciser ces limites et de voir son efficacité dans le domaine des granulats. Il existe deux principales limites à son utilisation dans le domaine aquatique.

Tout d'abord, la conductibilité de l'eau est un facteur important pour la propagation des ondes électromagnétiques. Lorsque l'eau est fortement chargée d'argile fine, elle empêche les ondes électromagnétiques d'atteindre le fond du lac. Pour l'utilisation, il faut étudier la colonne d'eau pour connaître sa conductibilité ce qui alourdit les dispositions avant l'étude. Sur la carrière de Miramont de Comminges, la conductibilité de l'eau a empêché la propagation des ondes lors de la campagne d'acquisition.

La seconde limite se situe au niveau de la granulométrie des sédiments. Le géoradar permet de visualiser des sédiments avec une granulométrie grossière. Il faudrait également arriver à calibrer cette granulométrie pour identifier ces sites d'études. Lors de nos campagnes, le géoradar a permis de visualiser le remplissage sédimentaire du lac de Loures-Barousse. Il serait judicieux de prélever des carottes pour la calibration de sédiments de ce lac.

#### **c) La comparaison entre ces deux méthodes : sismique réflexion et géoradar.**

L'un des objectifs majeurs de cette campagne était la comparaison des deux méthodes. Théoriquement, il existe une complémentarité : le géoradar visualise les sédiments grossiers et est absorbé par les sédiments fins, la sismique réflexion visualise les sédiments fins et est absorbé par les sédiments grossiers. Donc leur association sur un site constitué d'une variation granulométrique devrait apporter de meilleurs résultats. Mais les tests ont démontré qu'il existe d'autres verrous. Sur le lac de Loures-Barousse, pour un même profil, le géoradar a apporté une meilleure information sur des sédiments fins que la sismique réflexion. Le fait d'ajouter la conductibilité de l'eau pour le géoradar et la profondeur d'eau nécessaire pour la sismique réflexion rend la comparaison plus complexe.

## **2. Le projet de recherche de GEOFALCO.**

Le projet de recherche de GEOFALCO est de trouver la méthode géophysique adéquate » pour le suivi de gisements des granulats en milieu aquatique. Cette méthode devra permettre de réaliser

un suivi dans un temps réduit (environ une demi-journée) et utiliser des capteurs légers qui peuvent être intégrés sur des drones marins. Les recherches bibliographiques nous ont conduit vers les méthodes de sismique réflexion et de géoradar d'où ces campagnes de terrain.

A la sortie de ces tests, il en ressort plusieurs difficultés à prendre en compte.

Concernant la sismique réflexion, la première difficulté réside dans la profondeur d'eau. Les lacs de gravières ont des profondeurs qui varient entre 2 et 5 m en général, ils ne permettront pas une bonne propagation des ondes acoustiques. Les fréquences de 14kHz peuvent se propager dans ces faibles tranches d'eau mais sont générés par de lourds capteurs qui ne peuvent être intégrés sur les drones marins. Ensuite, les matériaux extraits semblent avoir une granulométrie plus grossière et ne peuvent être cartographiés par la sismique réflexion. Enfin, les capteurs utilisés pour la sismique réflexion ont des poids conséquents et ne peuvent pas être intégrés sur des drones marins. Pour l'utilisation de cette méthode, il faudrait augmenter la capacité de charge des drones marins.

Quand au géoradar, en plus de la granulométrie des gisements qui pose un problème, il faut surtout tenir compte de la conductivité de l'eau. L'extraction en eau remet des particules fines en suspension qui augmentent la conductivité de l'eau.

Ces tests révèlent que ces deux méthodes semblent avoir des limites qui empêchent leur utilisation dans l'industrie de granulat. Néanmoins, plusieurs autres tests sont à prévoir avec des capteurs de basse fréquence plus lourds. Aussi, la seconde possibilité serait de se réorienter vers d'autres méthodes tels que la méthode électrique et le Lidar vert.

### **3. La dynamique sédimentaire post-exploitation.**

Les lacs gravières ont été très peu étudiés dans les articles scientifiques. Ces profils devraient nous renseigner sur l'impact de l'extraction dans le fond du lac et de la dynamique sédimentaire.

La première observation concerne les crêtes des fonds des lacs. Elles ont été visualisées dans tous les lacs et seraient la preuve de l'extraction de granulat. Il serait judicieux de pouvoir identifier le type d'extraction et l'engin utilisé à partir de la forme des crêtes.

Ensuite, il a été observé un comblement post-carrière dans les lacs en fin d'exploitation tels que La Ramée et Loures-Barousse. Concernant les lacs en cours d'exploitation, l'hypothèse serait que les particules demeurent en suspension dans la colonne d'eau et se redéposent par la suite. Ces particules en suspension pourraient expliquer en partie la réponse du Géoradar dans le lac de Miramont-de-Comminges.

#### I- Campagne de terrain sur le site de Loures-Barousse.

#### BIBLIOGRAPHIE

#### WEBGRAPHIE

<http://www.statistiques.developpement durable.gouv.fr/lessentiel/ar/2055/0/lextraction-granulats.html>

[http://www.lafarge.dz/wps/portal/dz/3\\_B\\_2-tout-sur-le-granulat](http://www.lafarge.dz/wps/portal/dz/3_B_2-tout-sur-le-granulat)