

Université Toulouse Jean Jaurès Master Géographie des  
changements Environnementaux et Paysagers (M1 GEP) Mention  
Géographie, Aménagement, Environnement

## Acquisition et traitement de données 3D en milieu karstique

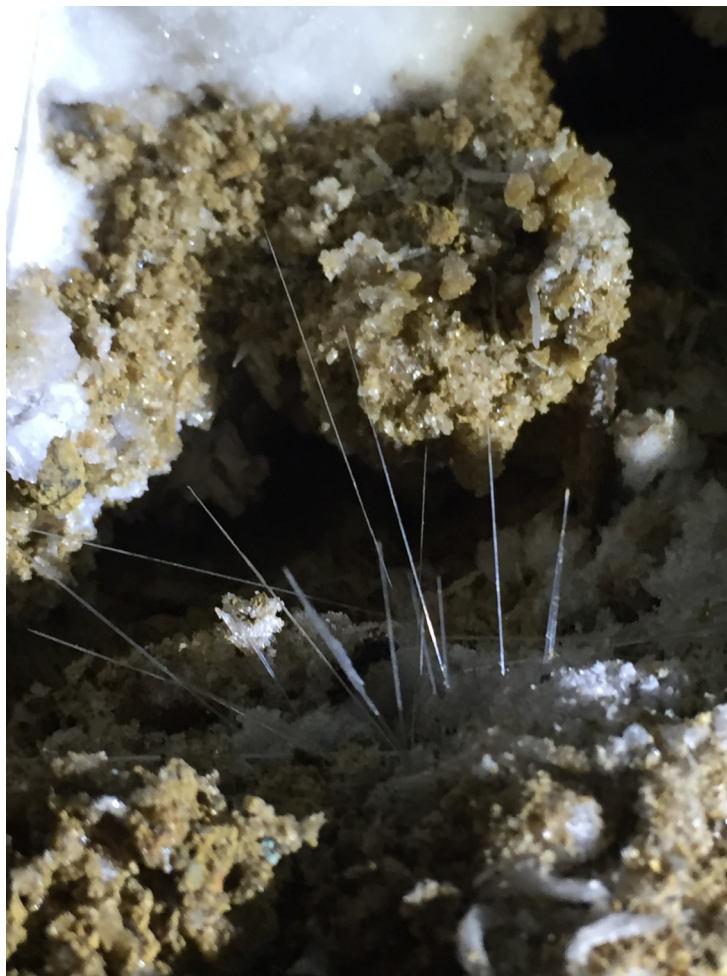


Figure n°1 : *Aiguille d'aragonite, photo personnelle*

Pradines Léa

Année universitaire 2017-2018

Sous la direction de : Bourges François et Bonnet Stéphane

Référent pédagogique : Chapron Emmanuel, professeur des universités

# Sommaire

Remerciements .....	3
Introduction.....	4
<b>I- Les structures d'accueil .....</b>	<b>6</b>
1- Le bureau d'étude "géologie environnement conseil".....	6
2- Le laboratoire GET "Géoscience Environnement Toulouse".....	6
<b>II- Les deux sites scannés.....</b>	<b>8</b>
1- La grotte de Pech-Merle.....	8
2- Le gouffre d'Esparros.....	9
<b>III- Les matériels et les méthodes employées.....</b>	<b>11</b>
1- Le scanner Trimble .....	11
2-Le scanner portatif ZEB-REVO.....	13
3- Le logiciel Realwork.....	14
<b>IV- L'utilisation des données récoltées.....</b>	<b>17</b>
1- Les données déjà existantes .....	17
2- Le traitement des données nouvelles.....	18
3- Vérification du recalage et ajustement manuel.....	20
<b>V- Les résultats .....</b>	<b>22</b>
1- Assemblage de tous les projets.....	22
2 - Les différences de données du scan Trimble et du ZEB.....	22
3- Calculs et productions visuelles.....	23
<b>VI- Discussion.....</b>	<b>28</b>
Conclusion.....	28
Liste des figures.....	29
Bibliographie.....	31
Annexes.....	33

## Remerciements

Je remercie Mr Bourges de m'avoir fait partager sa passion pour le monde souterrain, de m'avoir proposé un stage très passionnant même si je n'avais pas le meilleur profil. Je remercie également Mr Bonnet qui m'a fait découvrir le monde de la 3D et du Lidar, pour sa patience lorsque l'on cherchait des points précis au milieu de millions d'autres points. Mais également pour sa disponibilité, et sa gentillesse.

## Introduction

“Vers de grandes choses par des voies étroites” devise de Norbert Casteret, grand spéléologue du XXème siècle, qui a surtout exploré les cavités dans les Pyrénées. C’est à lui que l’on doit la découverte du gouffre d’Esparros, et de nombreuses autres cavités. Les grottes ornées comme la grotte Chauvet ou celle du Pech-Merle ont un intérêt archéologique très important, un intérêt historique, culturel et touristique. C’est un lieu qu’il faut étudier, et préserver, car les peintures sur les parois sont très fragiles et très réactives au changement climatique de la grotte. Lors des visites, la température de la grotte va se modifier et augmenter le temps du passage du groupe puis va diminuer lentement jusqu’à revenir à sa température normale. L’aérologie des grottes est très complexe à définir en fonction de la forme de la grotte, de sa profondeur, du nombre de salles, des boyaux, etc. C’est un environnement fermé, avec un climat spécifique à chaque grotte, car elles sont toutes différentes dû à leur géométrie. Les mesures de préservation des grottes sont donc élaborées au cas par cas, grâce à tout un nombre de mesure étalées sur plusieurs années.

Le karst a toujours été représenté en majorité en 3D, grâce à des blocs diagrammes, des vues cavalières, en perspectives,... Toutes formes de représentation qui donnent l’impression de relief, une représentation déportée. Au XXème siècle, Robert Oedl représente l’entrée de la grotte de skocjan grâce à une maquette.

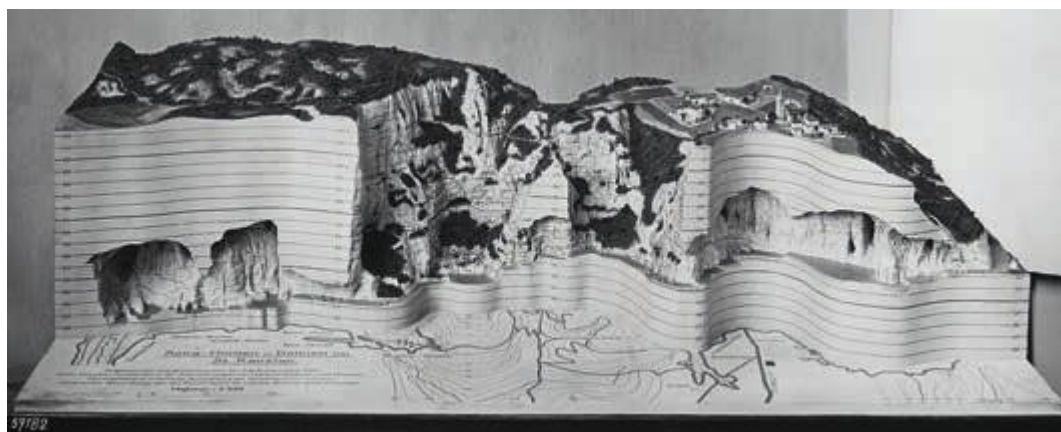


Figure n°2 : Maquette de Robert Oedl, récupérer sur le site <http://docplayer.fr>

Dans le courant des années 1990, avec l’essor de l’informatique, il apparaît des logiciels permettant de retranscrire les données topo acquises sur le terrain pour créer des images en 3D de la grotte. Cela est peu précis car les erreurs de mesure et de calcul, ne sont pas rectifiées par le logiciel.

L’utilisation de la technologie 3D dans les environnements karstiques est une méthode de travail récente, une petite quinzaine d’années. Le karst a une géométrie particulière, ainsi que son fonctionnement et son évolution, cela permet à la 3D d’être plus adaptée que l’était la 2D, afin de mieux représenter ces formes spécifiques. De nombreuses disciplines bénéficient des

apports de la 3D : l'hydrogéologie, l'aérogologie, la géomorphologie, l'archéologie, l'histoire, etc. Le tourisme s'intéresse à ces modélisations car il pourrait être envisageable de modéliser la grotte en 3D et de créer de la réalité virtuelle, afin permettre aux touristes de visualiser des lieux de la grotte inaccessible au public et de proposer une visite virtuelle pour les sites ou il n'y a pas d'accessibilité pour les handicapés. La 3D est utile à une multitude de discipline afin d'extraire au mieux le maximum d'information des environnements karstiques. L'utilisation de donnée Lidar permet une représentation 3D très précise, ce qui dépasse tous les autres modes d'imagerie 3D possible dans les grottes, comme la photogrammétrie. La qualité des données varie en fonction du matériel utilisé.

En première partie, je vais présenter les deux structures qui m'ont accueilli pendant toute la durée du stage. Puis, je décrirai les deux cavités où l'on a acquis les données, et pourquoi ces deux sites ont été choisis. Je présenterais le matériel et les méthodes utilisées. En quatrième partie, je décrirai l'utilisation des données, laissant place aux résultats. Et en dernière partie ce sera la discussion, suivi de la conclusion.

## I- Les structures d'accueil

### 1- Le bureau d'étude "géologie environnement conseil"

Alors que je travaille depuis plus de 3 ans à Saint-Girons, je n'avais jamais entendu parler du bureau d'étude Géologie Environnement Conseil de Monsieur Bourges. C'est lors de la recherche de stage que je me suis intéressée aux bureaux d'études présent près de chez moi. A la lecture de son site, je n'ai pas hésité une seconde à envoyer une candidature spontanée, l'appel du monde souterrain était trop fort. Il se situe en Ariège, dans le centre ville de Saint-Girons, 30 rue de la République.

Ce Bureau d'étude a été créé en 1996, en collaboration avec le laboratoire souterrain de Moulis où Mr Bourges a étudié l'hydrogéologie pendant une année. Avant cela, il travaillait comme géologue dans des gisements aurifères, notamment en Afrique. Son bureau d'étude est spécialisé dans le suivi environnemental, la protection et la gestion des milieux souterrains. La conservation des sites fragiles, comme les grottes a un intérêt culturel, touristique, historique (préhistorique) et géologique. Il étudie les zones karstiques. Il produit aussi des travaux de recherche, en collaboration avec différents laboratoires comme : Le CNRS de Moulis, le laboratoire LSCE à l'UMR CEA, Le laboratoire GET, le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, etc...



Figure n°3 : Logo du Bureau d'étude

C'est le bureau d'étude qui m'a embauché pour une durée d'un mois, du 4 avril 2018 au 4 mai 2018. Lors des deux périodes d'acquisition des données, j'ai travaillé avec Mr Bourges, Camille sa stagiaire et certains membres du laboratoire GET. Je ne pouvais pas traiter les données 3D au bureau d'étude car c'est Mr Bonnet du laboratoire GET qui sait comment faire. De plus, il faut un matériel de pointe, que possède le laboratoire et non le bureau d'étude. C'est pour cette raison que Mr Bourges travaille en relation avec des laboratoires de recherche.

### 2- Le laboratoire GET "Géoscience Environnement Toulouse"

Le laboratoire géoscience environnement Toulouse, se situe dans le complexe scientifique de Rangueil, 14 avenue Edouard Belin 31400 Toulouse. C'est un laboratoire de recherche fondamentale et appliquée. Il compte environ 250 personnes en comptant les étudiants, les doctorants, les post-doctorants, les CDD etc... On y retrouve des chercheurs de IDR ( Institut de Recherche pour le Développement ), du CNRS (centre National de Recherche Scientifique ), des chercheurs du CNES ( Centre National d'Etude Spatiale ), des enseignants chercheurs de l'université Toulouse 3 Paul Sabatier et des chercheurs du CNAP ( Centre National des Astronomes et des Physiciens ).

Dans ce laboratoire il y a 9 équipes de recherche :

- 1- Géoressources
- 2- Terre Interne - Lithosphère
- 3- Géophysique et Géodésie Spatiale
- 4- Couplage Lithosphère - Océan - Atmosphère
- 5- Hydro-biogéochimie de la zone critique
- 6- Interfaces
- 7- BioGéochimie expérimentale et modélisation des interactions fluides-minéraux-organismes vivants
- 8- Géochimie des Isotopes Stables
- 9- Géomatériaux

Avec ces neuf équipes de recherche, il y a 5 axes de recherche transversaux : Modélisation, Archéométrie, Risques, Géosciences marines et Télédétection-Expérimentation.

Grâce à toutes ces équipes de recherche, le laboratoire a une portée nationale et internationale. C'est un des laboratoires les plus complets en géologie, notamment en métallogénie et pétrologie.

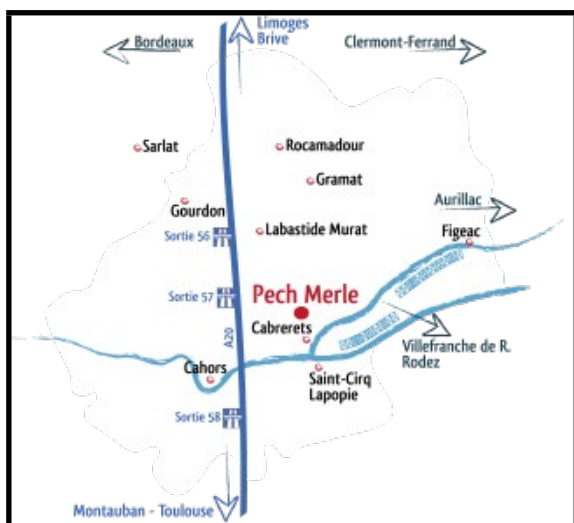


Figure n°4 : Logo du laboratoire GET, capture d'écran

Stéphane Bonnet est enseignant chercheur à l'université Toulouse 3 Paul Sabatier, c'était mon maître de stage. Il travaille au sien de ce laboratoire, il est spécialisé en géomorphologie. Il est chargé de l'acquisition et du traitement des données 3D.

## II- Les deux sites scannés

### 1- La grotte de Pech-Merle



La grotte de Pech Merle se situe dans le département du Lot (46), sur la commune de Cabrerets. Cette grotte est ornée, elle est classée monument historique depuis 1951. Cette grotte compte 2 étages, avec de nombreuses salles et c'est une succession de puits et de galeries pour communiquer entre elles. Cette grotte s'est creusée en régime noyé dans premier lieu, puis il y a eu un remplissage argileux et une évacuation qui a fait écrouler le plancher à plusieurs endroits. Lorsque les hommes préhistoriques sont entrés dans la grotte elle ressemblait à celle d'aujourd'hui, à quelques concrétions près. Les galeries sont majoritairement sèches.

Figure n°5 : plan d'accès <http://www.pechmerle.com/>

La grotte a toujours été connue, mais personne n'avait réussi à trouver l'entrée des salles ornées. Ce sont des adolescents André David, Marthe David et Henri Dutertre, qui en 1922 découvrent les salles ornées. A ce jour, sont connues les salles rouge, blanche et la salle des peintures. Les autres salles sont découvertes dans la foulée, sauf le Combel qui lui est obstrué par un cône d'éboulis. Ce n'est quand 1949 qu'est désobstrué l'accès au Combel.

La grotte a été occupée par des animaux, on retrouve des bauges et griffures d'ours des cavernes. Les hommes préhistoriques ont aussi occupé la grotte, sur 7 cavités, ils n'en ont utilisé que deux. Les peintures montrent l'occupation humaine, mais aussi les traces de pas sont reconnues depuis 1929, elles sont fossilisées. La grotte n'aurait pas servi d'habitat mais plutôt de point de repère épisodique, selon Michel Lorblanchet. L'occupation humaine date du Gravettien et du Magdalénien. Il y a plus de 700 motifs graphiques (peintures et gravures),



dont 70 représentations animales : bisons, mammouth, ... 28 représentations humaines et empreintes de mains et 550 ponctuations. La fresque des chevaux (la plus connue), serait daté de 29 000 BP.

Ces motifs graphiques sont très sensibles aux fluctuations du microclimat de la grotte, c'est pour cette raison que le ministère

Figure n°6 : les chevaux de Pech-Merle, photo de Sébastien Chastanet (OMP)



de la culture et du patrimoine finance Mr Bourges. Une peinture de bison a presque disparu. Il ne faudrait pas que les autres disparaissent. Cela fait 20 ans que Mr Bourges assure le suivi environnemental de la grotte, afin de comprendre pourquoi cette peinture a pu disparaître. Avec de nombreux capteurs placés à différents endroits de la grotte, il peut donner ses restrictions en matière d'affluence, de temps de visite,... Le microclimat de cette grotte entraîne de l'humidité sur les parois de la grotte à certains moments. Il essaie de comprendre comment cela arrive et donc, trouver des solutions pour éviter les peintures souffrent de l'humidité. L'utilisation de la 3D dans la grotte va permettre à Mr Bourges d'obtenir des calculs de volume précis, de savoir exactement où se situe la grotte par rapport au sol, des données qui vont l'aider pour établir le microclimat.

## 2- Le gouffre d'Esparros

Le gouffre d'Esparros se situe dans le département des Hautes Pyrénées (65), dans la



Figure n°7 : Carte de situation

vallée des Baronnies. Ce gouffre compte parmi un des plus beau d'Europe, sa particularité est la formation de cristaux d'aragonites sur ses parois. En 1938, Norbert Casteret, sa femme Elisabeth et Germain Gattet vont explorer le gouffre et découvrir toute la richesse de ce gouffre.

L'exploration se fera sur plusieurs mois. La vallée des baronnies est une vallée calcaire, on y dénombre plus de 400 cavités. En 1983, le site est inscrit sur la liste des 12 plus belles cavités de France à préserver. Le gouffre se serait formé pendant le quaternaire (entre 50 000 et 1 millions d'années). Le gouffre appartient à la commune d'Esparros, le site a ouvert au public en 1997. Le gouffre est profond de 130m.

Le tunnel d'accès pour le public a été construit en 1995, et c'est aussi à cette date-ci que Mr Bourges commence le suivi environnemental du gouffre. L'enjeu de ce site est de réussir à préserver les cristaux et qu'ils continuent leur progression. Il ne faut pas modifier le microclimat du gouffre, et donc bien évaluer l'impact des visites, des lumières et des aménagements.



La particularité de ce site est la répartition des cristaux d'aragonite sur les parois. Il y a une cassure visible à une certaine hauteur sur la paroi, l'aragonite se développe du sol jusqu'à mi-paroi mais cela change en fonction de où l'on se trouve dans le gouffre.

Sur cette image on voit bien la rupture nette, et cela est dû au microclimat du gouffre. La particularité de ce climat est qu'il fait plus chaud au niveau du sol et plus froid au niveau du plafond. D'habitude c'est l'inverse, c'est pourquoi l'étude de ce microclimat est compliquée, et pour le moment les spécialistes ne peuvent pas dire avec exactitude pourquoi il y a ce phénomène d'inversion thermique.

Les données 3D acquises ici, vont permettre de définir si la ligne d'aragonite est à la même hauteur tout le long du gouffre, afin de vérifier les hypothèses émises. Pour savoir exactement à quelle profondeur se trouvent les salles, les calculs de volume, etc.

Figure n°8 : Schéma de cassure de l'aragonite, photo personnelle

### III- Le matériel et les méthodes employées

#### 1- Le scanner Trimble

Le scanner utilisé pour l'acquisition des données 3D est le “scanner 3D laser Trimble TX8”. Ce laser prend un million de points par seconde, ce qui permet d’avoir une grande précision, il peut scanner entre 1 mètre et 340 mètre. Bien sûr, l’espacement entre les points n’est pas le même (plus on scanne loin, plus l’espace entre les points augmente), il tourne à 360°. C’est un scanner très performant, car il allie précision et rapidité.

Scan Parameters	Preview	Level 1	Level 2	Level 3	Extended <sup>1</sup>
Max range	120 m	120 m	120 m	120 m	340 m
Scan duration (minutes) <sup>2</sup>	01:00	02:00	03:00	10:00	20:00
Point spacing at 10 m	15.1 mm	-----	-----	-----	-----
Point spacing at 30 m	-----	22.6 mm	11.3 mm	5.7 mm	-----
Point spacing at 300 m	-----	-----	-----	-----	75.4 mm
Number of points	8.7 Mpts	34 Mpts	138 Mpts	555 Mpts	312 Mpts

Il y a 4 modes d'utilisation, le premier de 1 min, le deuxième de 3min, le troisième de 10 minutes et le dernier de 20 minutes. Plus la durée est longue, plus le nuage de point sera lourd et plus le scan sera précis. Durant le stage nous

Figure n°9 : Tableau des paramètres du scanner

avons utilisé le mode 2 et 3. Le mode 4 est trop long et les fichiers auraient été trop lourds, surtout que nous n’avons pas besoin de scanner à 300 mètres dans la grotte. Le mode 3 est assez précis pour le travail à réaliser.



Le scanner possède un miroir qui tourne sur lui-même, le laser sort de dessous le miroir. En fonctionnement, le laser va se réfléchir contre le miroir et va aller jusqu’à la paroi puis revenir au miroir qui va le renvoyer à son point de départ. C’est grâce à ce temps de réflectance que le scanner calcule la distance entre la paroi et le scanner, c’est comme ça que se forme le nuage de point, donc le relief. Pour l’acquisition, il faut que le scanner soit sur un trépied et de niveau. Chaque scan se nomme “une station”. Lorsque l’on allume le scanner, on choisit le nom de la session. Il faut le notifier qu’une fois, à partir de là, le dossier est créé sur la clef USB annexe, et chaque station s’enregistre dans l’ordre. Une fois toutes les acquisitions faites, il faut assembler les stations entre elles. Pour ce faire, nous avons installé au préalable à chaque station des

Figure n°10 : Scanner Trimble, photo personnelle sphères (comme sur la photo), autour du scanner.

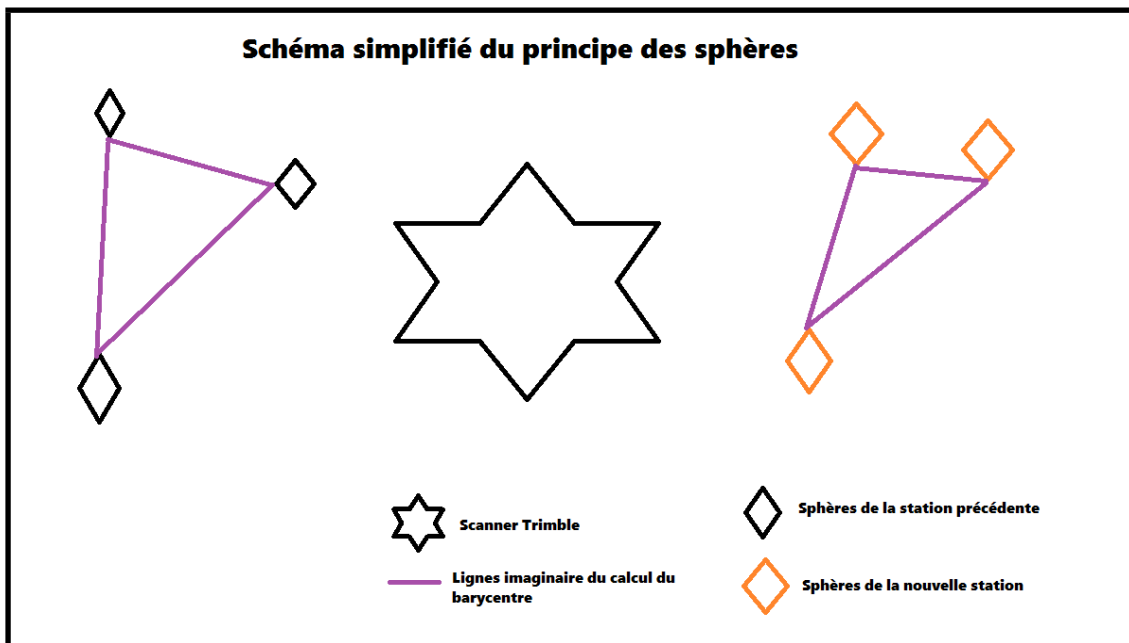


Figure n° 11 : Schéma du principe des sphères, réalisation personnelle

Sur le schéma, on comprend le positionnement des sphères. A chaque nouvelle station, on ajoute 3 sphères, ici en orange sur le schéma. Il reste les sphères de la station précédente, il est primordial de ne pas les toucher, et de ne pas les enlever car ce sont les sphères en noir sur le schéma qui vont nous permettre de recalcer les deux stations entre elles. On ajoute les sphères oranges qui, si l'on continue de scanner, dans ce cas, elles deviendront noires, et ainsi de suite.

Toutes les sphères que l'on a utilisé ont un même diamètre (140mm), et pour que le logiciel sache quelles sphères représentent quelles sphères, il va calculer le barycentre des sphères entre elles. Et lorsqu'il retrouve le même barycentre à 2 endroits, il sait que ce sont les même



sphères, et donc il assemble les deux stations. C'est ce que l'on appelle le recalage par cibles. Avec ce fonctionnement par sphères, il faut savoir où l'on va positionner le scanner à la station suivante afin de positionner les 3 nouvelles sphères (orange sur le schéma) de manière à ce qu'elles soient visibles par les deux stations. Ces sphères peuvent être posées sur un piquet, sur un trépied ou un socle. Elles sont aussi aimantées, ce qui nous permet de les mettre sur des rambardes en fer ou autres.

Durant le stage, nous nous sommes servis de ce scanner pour le gouffre d'Esparros, car ce n'était que des grandes salles. Pour la grotte du Pech-Merle, nous avons utilisé ce scanner pour les grandes salles, et les couloirs. Mais pour cette commande il fallait aussi scanner les boyaux. Le scanner Trimble n'étant pas adapté, nous avons utilisé un scanner portatif.

Figure n° 12 : Une sphère, photo personnelle

## 2-Le scanner portatif ZEB-REVO

Le scanner portatif et rotatif ZEB-REVO est un outil très maniable, léger, et petit qui permet de scanner dans des endroits exigües où un scanner sur pied ne passe pas. Ce scanner est aussi utilisé dans la construction car c'est plus rapide de scanner avec ce scanner qu'avec le Trimble. Mais la qualité n'est pas la même.

### CARACTÉRISTIQUES

Angle de champ de vision vertical plongeant	270°x360°
WiFi	Portée jusqu'à 15m de l'appareil
Batterie	Lithium Ion
Poids	1 kg
Dimensions	86mm x 113mm x 287mm
Portée	30m (intérieur)/ 15m (extérieur)
Champ visuel	270° x 360°
Modes d'exposition	Auto
Fréquence de mesure	43 200 points/sec
Classe du laser	1

Figure n° 13 : Tableau de paramètre du scanner Zeb

Le scanner ne pèse qu'un kilo, cela augmente sa maniabilité. Il scanne jusqu'à 30 mètre, ce qui est peu comparée au trimble.



Figure n°14 : Scanner Zeb

Comme on le voit sur les photos, on tient le scanner à une main, il est relié par un câble d'alimentation à un boîtier noir, qui stocke les données. Ce boîtier se porte dans le dos, pour plus de maniabilité.

Pour commencer une session de scan, il faut poser la scanner sur un support fixe, comme une petite tablette, un tabouret, ou autre. On pose le scanner sur ce support, et on allume la session de scan. Une fois le scanner prêt, on le prend avec la main, en essayant de ne pas faire bouger le support, car à la fin du scan, il faut revenir au point de départ et le poser sur le socle. C'est ce qui lui permet de se recalibrer.

L'avantage de ce scanner est que l'on a pu scanner les boyaux de la grotte du Pech-Merle, et donc on va pouvoir savoir exactement à quelle distance des salles et de la surface ils se trouvent. Les données de ce scanner peuvent



Figure n°15 : Scanner Zeb

être traitées sous le même logiciel que le Trimble. Cela facilite le travail.

L'inconvénient est que pour recalibrer les données du Zeb et du Trimble, est la différence du nombre de point. Le nuage de point du scanner Zeb est petit comparé au Trimble, ce qui implique de la difficulté de reconnaissance des formes précises dans le nuage de point du Zeb. C'est compliqué de recalibrer une stations Zeb et Trimble ensemble.

### 3- Le logiciel Realwork

Le logiciel Realwork est fourni avec le scanner Trimble, c'est un logiciel de traitement de données (les nuages de points). Ce logiciel fonctionne avec une petite clef usb, qui se branche pour chaque utilisation, c'est la licence. Grâce à ce logiciel on peut faire des maillages, des calculs de volume, de la modélisation, ...

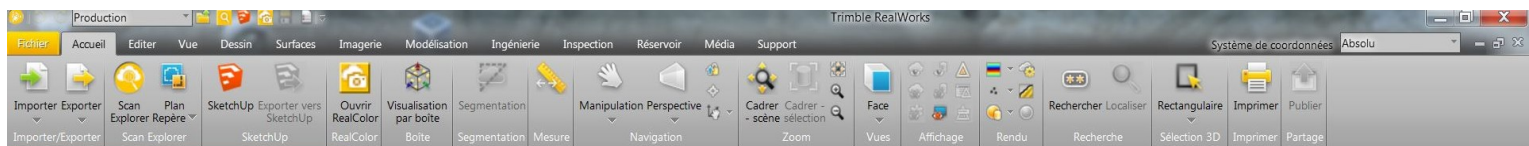


Figure n°16 : Menu du logiciel

Le menu du logiciel se présente de cette manière, il peut être mis en relation avec des logiciels de traitements 3D, comme Sketchup.

Pour insérer des données dans le logiciel, il faut apporter les données sous le format .TZF. Ces données sont lourdes, et le logiciel met un certains temps pour extraire les scans. En général, on extrait les fichier .TZF d'une journée, et non d'une session de plusieurs jours. Car le logiciel et l'ordinateur aurait du mal à fonctionner correctement, mais aussi, on aurait du mal à si retrouver parmi tous les nuages de points.

Voici la page vierge du logiciel, il y a deux fenêtres ouvertes en permanence : l'espace de travail et la liste des nuages de points ouvert.

Ici, le nuage de point est masqué. On remarque en bas à droite, l'axe X,Y,Z, qui permet d'orienter le modèle 3D. Ce logiciel permet d'avoir des vues en coupes, selon l'axe que l'on souhaite, on peut aussi choisir la couleur du nuage (soit par hauteur, soit par nuage, par station, en couleur vrai). Le mode couleur vrai n'est pas disponible automatiquement, pour qu'il soit fonctionnel, il faut insérer un panorama sur un scan et trouver 3 points identiques sur le scan et la photographie. Cette manipulation se fait sous le logiciel RealColor, accessible depuis Realwork

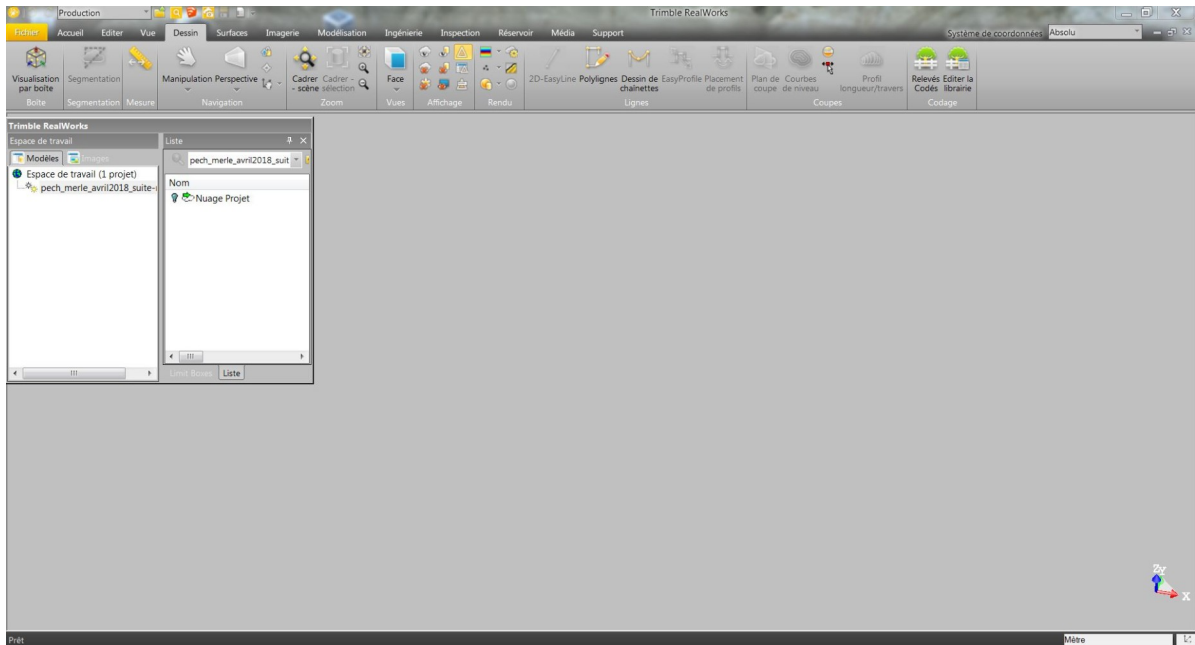


Figure n°17 : Capture d'écran du logiciel

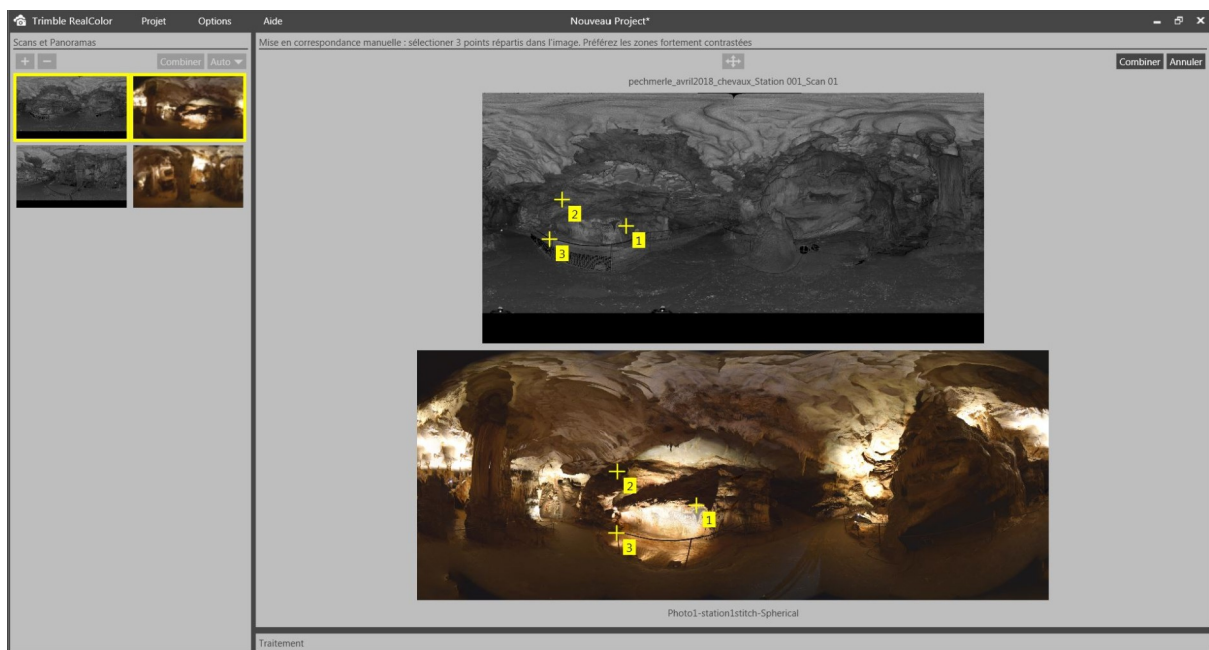


Figure n°18 : Logiciel Realcolor, capture d'écran

La photographie montre les 3 points identiques, le panorama en bas et le scan en haut. Grâce à ces trois points, le logiciel peut recalibrer la photographie sur le scan et enregistrer la couleur correspondante.

Voici le résultat :



Figure n°19 : Capture d'écran de la frise des chevaux colorés

L'image est très pixelisée, on remarque les chevaux, les différentes couleurs. Comme on colore à partir d'une image en 3D, sur un scan en 2D, il y a des problèmes sur la profondeur, les formes qui ne sont pas coloriées apportent des tâches. De plus, à chaque obstacle qu'il y a eu devant le scan, le derrière qui n'a pas pu être scanné, reste sans couleur. Comme on le voit pour la barrière. Ici, les couleurs réelles n'ont pas grand intérêt, car pour faire quelque chose de réussi, il faudrait scanner dans tous les angles de vue et prendre en photo dans tous les angles de vue, pour avoir quelque chose de net.

Ce logiciel permet de faire différents rendus visuels, il est complet, assez facile d'utilisation. Cependant, un guide d'utilisation plus détaillé serait le bienvenue, car il y a souvent différents choix possibles, mais ils ne sont pas expliqués dans le guide fourni. L'avancement se fait à tâton.



## IV- L'utilisation des données récoltées

### 1- Les données déjà existantes

Les travaux d'acquisition de données 3D sur la grotte du Pech-Merle ont commencé en 2016, Il y a eu plusieurs sessions de scan avant celle à laquelle j'ai participé. Lors des sessions précédentes, Stéphane et son équipe ont scanné l'extérieur de la grotte, la salle du Combel, la salle des disques, la salle des peintures, et la moitié de la galerie de l'ours. Lors de cette session, nous avons fini de scanner la galerie de l'ours et les salles rouges.

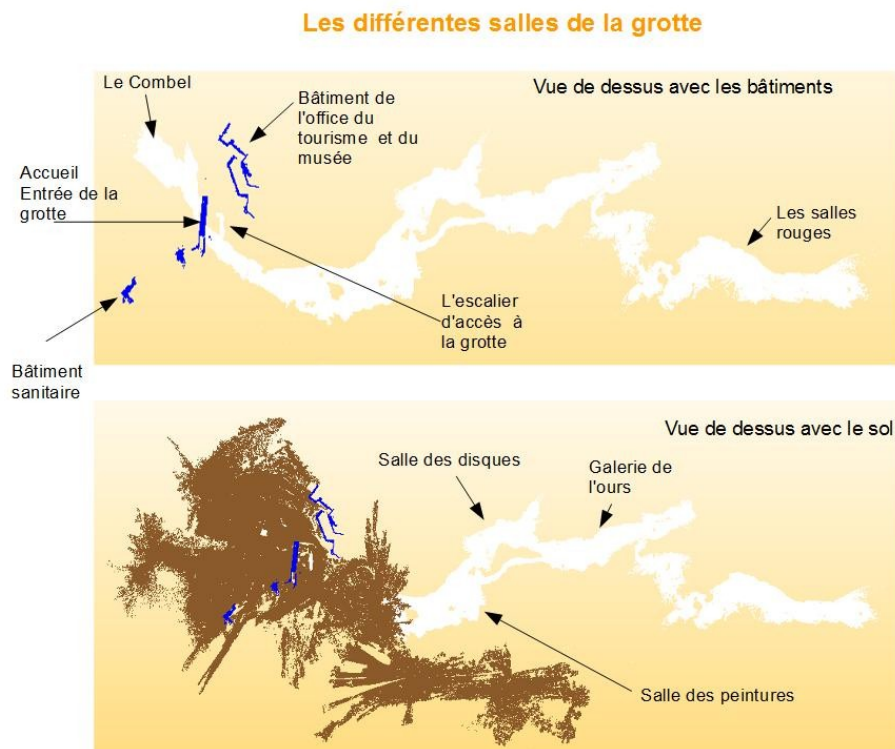


Figure n°20 : *Production personnelle montrant les salles de la grotte du Pech-Merle*

Comme la grotte est grande, il a fallu effectuer plusieurs sessions. Le traitement des données est compliqué car les fichiers sont lourds. Cependant grâce au carnet de Stéphane, où il note les différentes stations dans un schéma et les différentes sphères présentes, on a su exactement où était la dernière station de la session précédente. On a pu reprendre là. Ces informations sont précieuses pour les manipulations de recalages

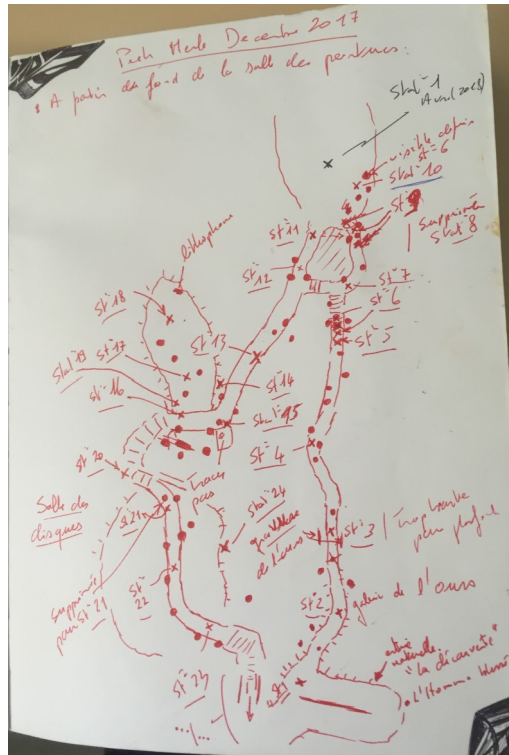


Figure n° 21 : Photo du schéma des stations et des sphères réalisés par Stéphane Bonnet lors de la session

Pour la session à Esparros, il n'y avait jamais eu d'acquisition 3D effectuée par Stéphane et son équipe.

## 2- Le traitement des données nouvelles

Lors du stage, nous avons acquis de nouvelles données 3D, dans la grotte du Pech-Merle. Nous avons repris le travail de la session suivante, à partir de la fin de la salle de la galerie de l'ours. Nous étions 4 : Stéphane, Léopold (un doctorant), Camille (la stagiaire de François) et moi, pour l'acquisition des données. Lorsque nous sommes rentrés à Toulouse, Stéphane m'a appris à me servir du logiciel Realwork, afin d'assembler les données.

Tout d'abord, j'exporte les scans TZF de la première journée sur le logiciel Realwork, puis j'ai un nuage de point qui apparaît. Je peux choisir de discerner chaque nuage de point correspondant à une station. Pour le moment je n'ai aucune station correctement recalée entre elles, il faut que je dise au logiciel de les recalcr à partir des sphères. En premier, je choisis l'onglet recalage, en haut à gauche de l'écran, puis, je clique sur l'icône "recalcr à partir des cibles".

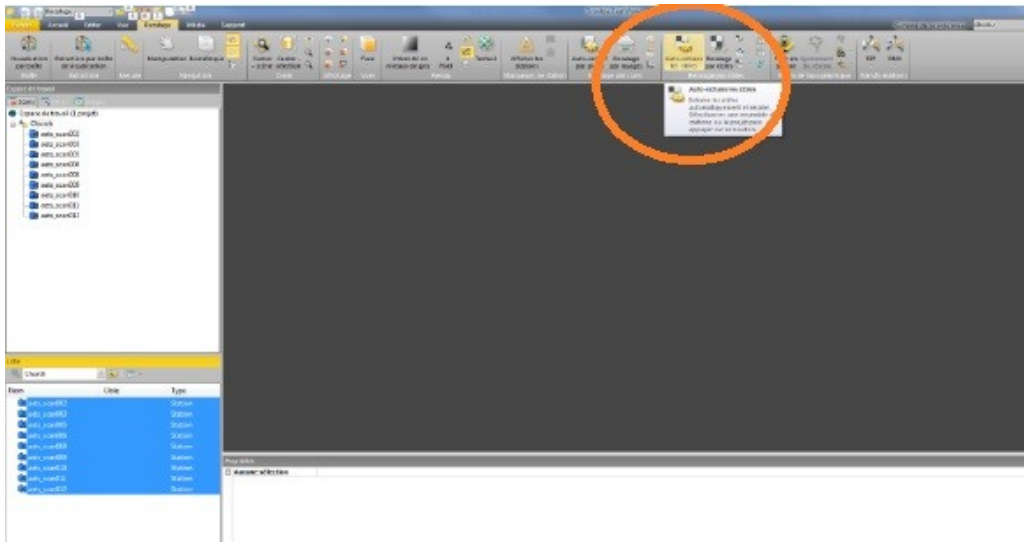


Figure n°22 : Capture d'écran, menu recaler par cible

Suite à ça une autre fenêtre s'ouvre, je dois indiquer au logiciel le diamètre des sphères, afin qu'il puisse les repérer et les extraire.

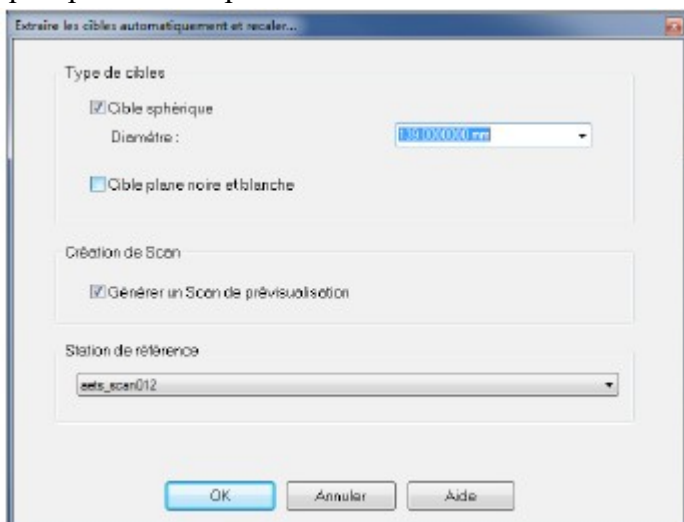


Figure n°23 : Capture de la fenêtre des cibles

On utilise des sphères de diamètre 140mm. Celles que l'on a utilisé sont vendues avec le scanner, en option. On pourrait faire les mêmes manipulations avec des sphères en polystyrène achetées en grande surface, mais les manipulations seraient moins précises, notamment lors du recalage entre les différentes stations. Dû à la qualité de leur fabrication, et leur fragilité, elles sont facilement déformables. Donc, pour les calculs de barycentre qu'effectue le logiciel au moment du recalage, il faut que les sphères soient toutes du même diamètre, comme on lui précise dans la fenêtre au dessus.

Lorsque le diamètre des cibles est renseigné, il faut cliquer sur la fonction extraction des cibles en choisissant une station de référence. Ici, c'est la première station qui est choisie, comme c'est une grotte en enfilade, les stations se suivent en long. Ensuite, il faut dire au logiciel de "auto-apparier tout". Des couches apparaissent sur l'écran, qui correspondent à chaque station. Un rapport d'erreur va être envoyé, il nous permet de savoir s'il y a des grosses erreurs d'ajustement. Ce n'est pas très fiable, la vérification visuelle est conseillée avant de valider le recalage.

### 3- Vérification du recalage et ajustement manuel

Pour vérifier que les stations soient bien reliées entre elles, il faut que je vérifie manuellement, la jonction entre chaque station. Pour ce faire, on choisit la station de référence et celle qui suit, il ne faut avoir que ces deux stations qui s'affichent sur l'écran, on avance deux par deux. Donc, quand les deux stations apparaissent sur l'écran, le mode couleur est "une couleur pour chaque nuage", comme ça, il est plus facile de distinguer les éventuelles erreurs de recalage.

Voici des captures d'écran qui montrent les différents éléments qui nous permet de savoir si les stations sont bien reliées entre elles.

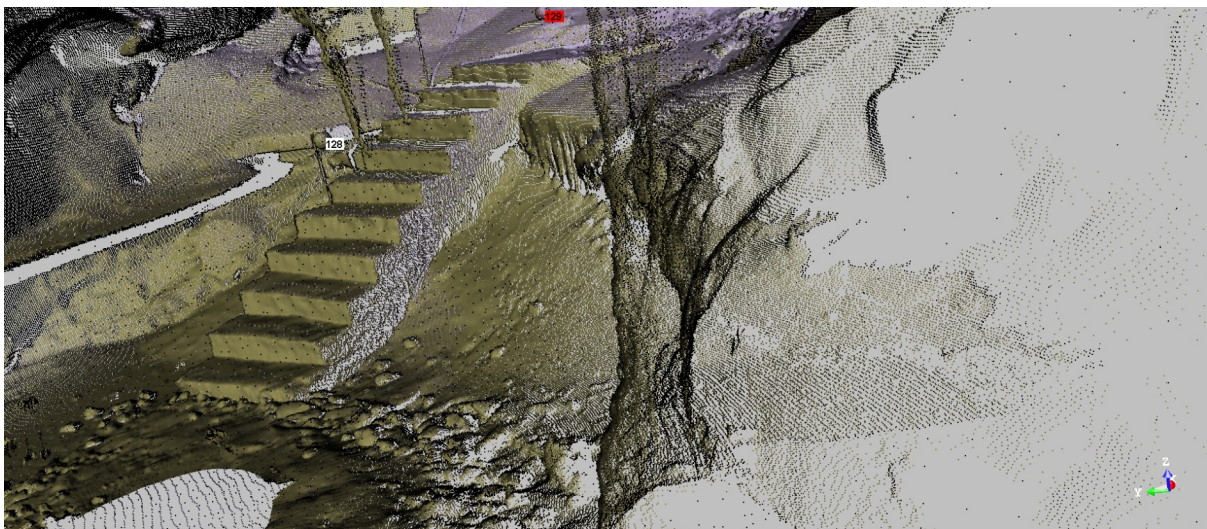


Figure n°24 : Capture d'écran d'un essaie de recalage à partir de l'escalier

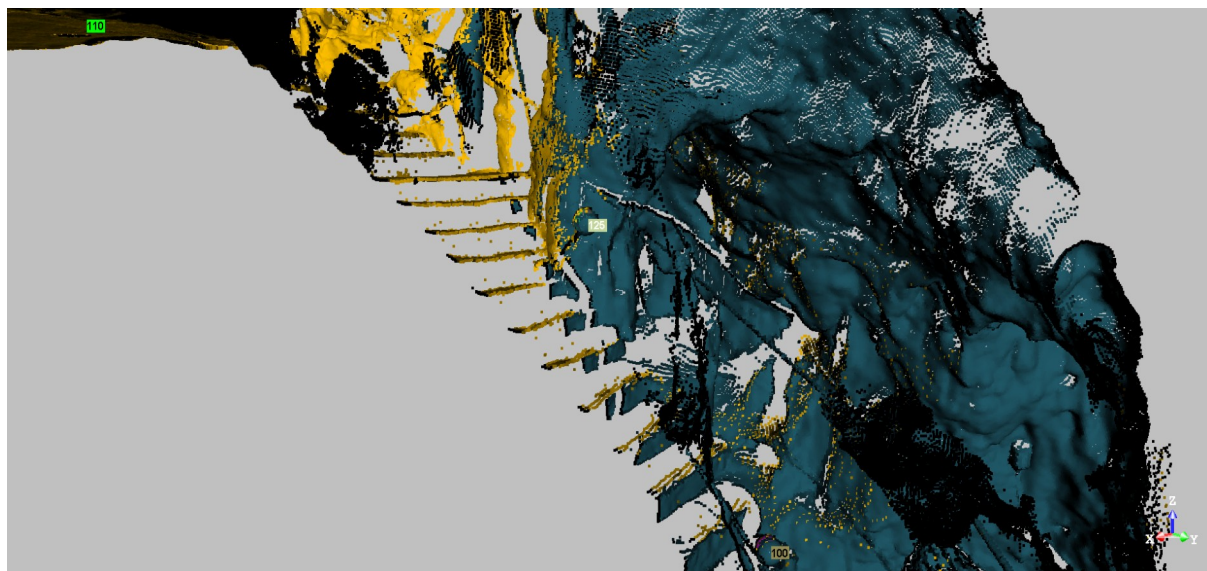


Figure n°25 : Capture d'écran d'un essaie de recalage à partir de l'escalier

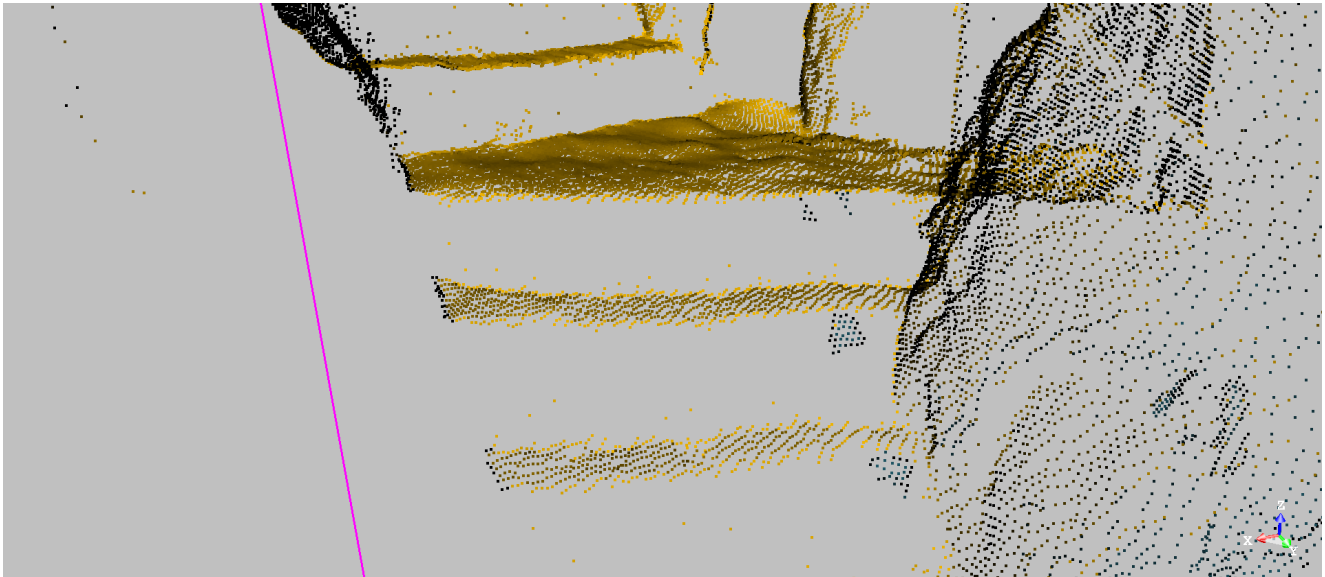


Figure n°26 : Capture d'écran d'un essai de recalage à partir de l'escalier

Les arêtes des marches d'escaliers sont de bons repères pour savoir si les deux stations se sont bien recalées. En effet, si l'on distingue bien les deux couleurs sur une même arête, ou bien sur les contres-marches de l'escalier, cela veut dire que les deux stations sont bien reliées. Il arrive des moments où nous sommes dans une partie non aménagée, et il n'y a pas de marches ou de barrière bien droite qui permettent de facilement vérifier le recalage, on va utiliser les concrétions fines.

C'est de cette manière que l'on va analyser le recalage de toutes les stations. Il arrive que certaines stations ne se soient pas reliées entre elles dû à différents facteurs : soit une cible a mal été scannée, soit la cible prévue n'était pas visible pour le scanner, ou encore le scanner n'a pas reconnue la cible,... Dans ces cas là, il faut d'abord analyser à quelle station correspond la station qui ne s'est pas reliée correctement. Ensuite, manuellement il est possible de relier les stations en mettant en lien les cibles lorsque le logiciel ne les a pas reconnues. Il faut aller dans la liste des sphères dans l'onglet liste qui est affiché sur l'écran. Une fois que l'on a cliqué sur la cible qui n'a pas été ajusté, il suffit de faire un clique droit sur la cible, et choisir « ajuster à ... ». Avant d'effectuer cette dernière manipulation, il faut bien analyser : à quelle cible correspond la cible non reconnue. Cela peut prendre un peu de temps mais c'est important. Lorsque la cible est ajustée, il faut cliquer sur ajuster, ce qui envoie un nouveau rapport d'erreur.

Le plus compliqué dans ces manipulations c'est de s'habituer à la vision 3D, car les nuages de points sont denses, et il est compliqué de discerner la profondeur du nuage lorsque que l'on zoome sur certains points stratégiques.

Cette étape d'assemblage montre à quel point il est important de bien placé les cibles lors du scan, et de bien prévoir les stations suivantes, afin que les cibles soient visibles sur la prochaine station, et au mieux sur les deux autres. Au cas où le logiciel ne reconnaît pas une cible. Là aussi, le schéma de positionnement des cibles et des stations est très important. C'est une aide précieuse pour le recalage.

## V- Les résultats

### 1- Assemblage de tous les projets

Une des étapes la plus importante du projet est l'assemblage des différentes parties de la grotte. Pour ce faire, il faut avoir un ordinateur ultra-puissant car les données 3D sont lourdes et demandent beaucoup d'effort à l'ordinateur. Pour fusionner les projets, il faut le faire deux par deux. Tout d'abord on importe deux projets dans le logiciel, dans le menu éditer, on choisit l'option fusionner les projets. Si les deux projets partagent des sphères communes, il faut alors appareiller ces sphères entre elles et effectuer un recalage par cible. Si ce n'est pas le cas, il faudra faire des manipulations de recalage manuellement, soit en créant des cibles sur des endroits stratégiques visibles des deux projets, soit faire un recalage par nuage, moins précis mais efficace. La version manuelle prend plus de temps car il faut inspecter le terrain, avant de placer les 3 sphères créées. Lors de cette étape, il faudra sélectionner juste les deux stations qui font jonction, et non l'ensemble des projets. Cela allégera le fichier et évitera à l'ordinateur de dysfonctionner. Cette étape a été compliquée car une fois tous les fichiers du scanner Trimble reliés, le projet pèse environ 300 Go. Et lors de l'étape des productions visuelles, l'ordinateur Bridget (le plus puissant du laboratoire) avait du mal à répondre au mouvement du modèle 3D.

### 2 - Les différences de données du scan Trimble et du ZEB

Il a fallu assembler les données acquises avec le scanner Zeb avec les stations du Trimble. L'importation des données se fait sous un autre format (LAS). Il faut faire un recalage par nuage, à l'aide de trois points d'accroche, qui sont présents sur les deux stations. On a pris des jonctions de barrière de sécurité, des concrétions facilement reconnaissables, etc. Le plus dur a été de trouver ses points dans le nuage de point du scanner Zeb, car il est moins précis que le scanner Trimble, il y a moins de point, donc lorsque l'on zoom, il est très facile de se tromper. Sur toutes les stations que l'on a fait avec le scanner Zeb, seulement une a été reliée au projet. Ça prend beaucoup de temps de cibler les points, la qualité du scanner Zeb est un frein. C'est compliqué de ne pas se tromper, et après une heure de recherche de points communs, les yeux commencent à fatiguer. Pour faciliter ces manipulations, il faudrait coordonner les prises du scanner Trimble et Zeb, pour pouvoir ajouter des piquets entre les deux stations afin qu'ils servent de point de recalage. Plus bas, voici une capture d'écran qui montre un essai de recalage. A droite la station faite avec le Trimble, à gauche la station avec le scanner Zeb. On comprend bien la différence de qualité, et les trois points de recalage.

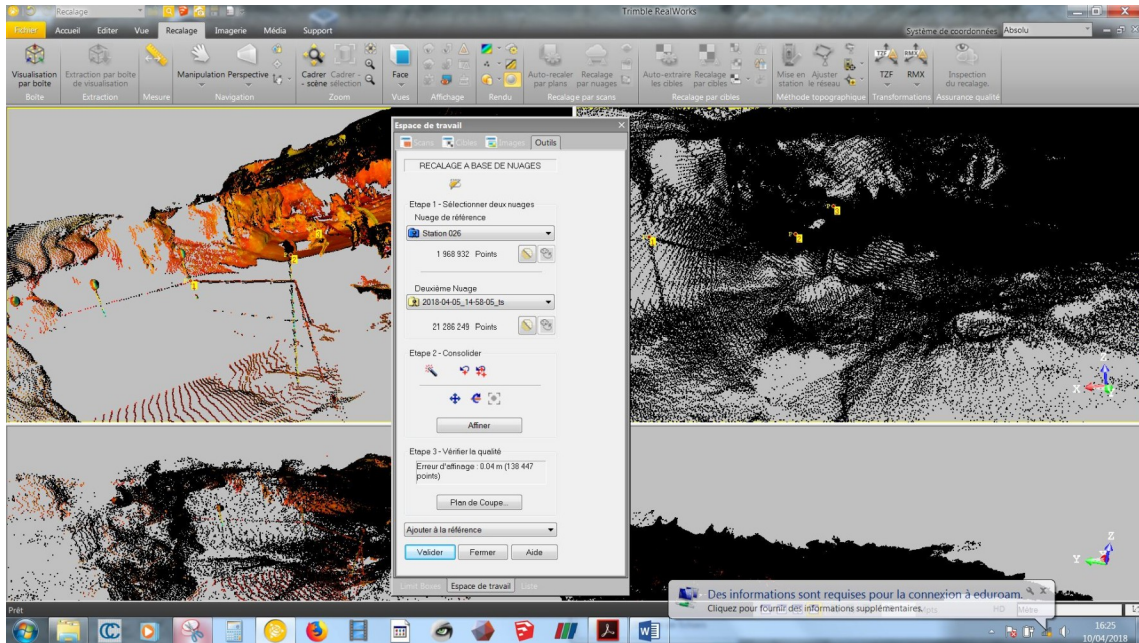


Figure n°27 : Capture d'écran montrant le menu de recalage à partir d'un nuage

### 3- Calculs et productions visuelles

Ce logiciel est capable de calculer des volumes, des distances,... Là est l'intérêt d'avoir scanner la grotte en 3D. Pour le suivi environnemental qu'effectue François Bourges, il lui manquait des éléments, pour pouvoir mieux adapter ces méthodes de préservations.

#### Le calcul de volume

Pour calculer le volume d'une salle, il suffit de sélectionner la salle sur le logiciel, d'aller sur l'onglet calcul de volume. Le logiciel va effectuer un maillage du modèle 3D, c'est grâce à ce dernier qu'il peut calculer le volume.

Voici l'exemple des salles rouges :

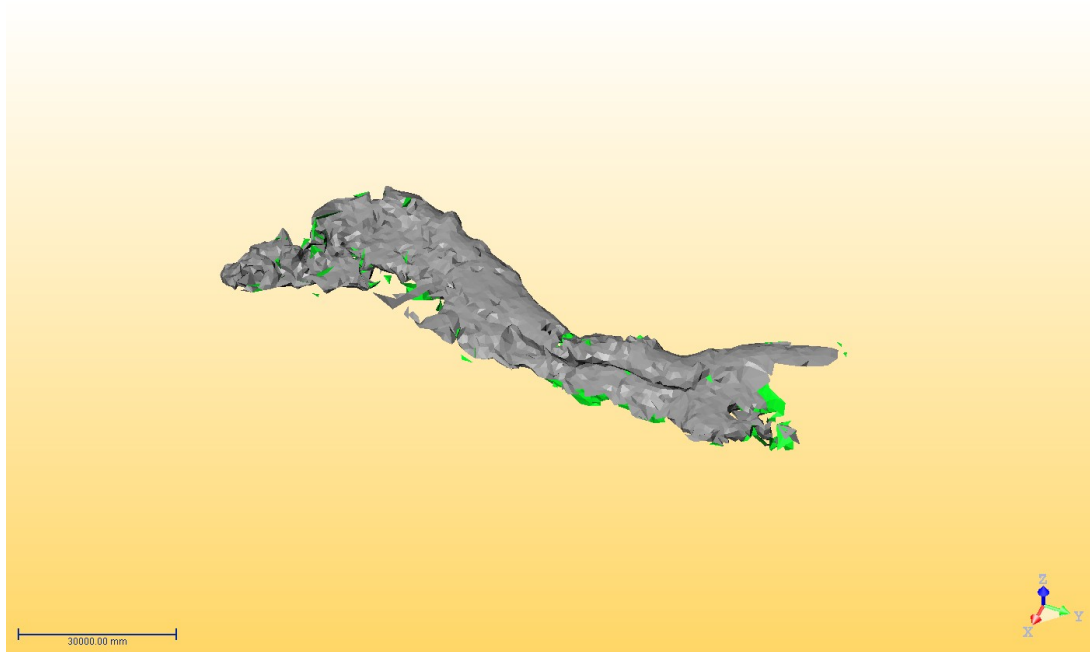


Figure n°28 : *Maillage à 1000, capture d'écran*

Cela prend un peu de temps de faire un maillage car ce n'est pas une surface lisse. Ensuite, je peux calculer le volume, à l'aide de la fenêtre calcul de volume.

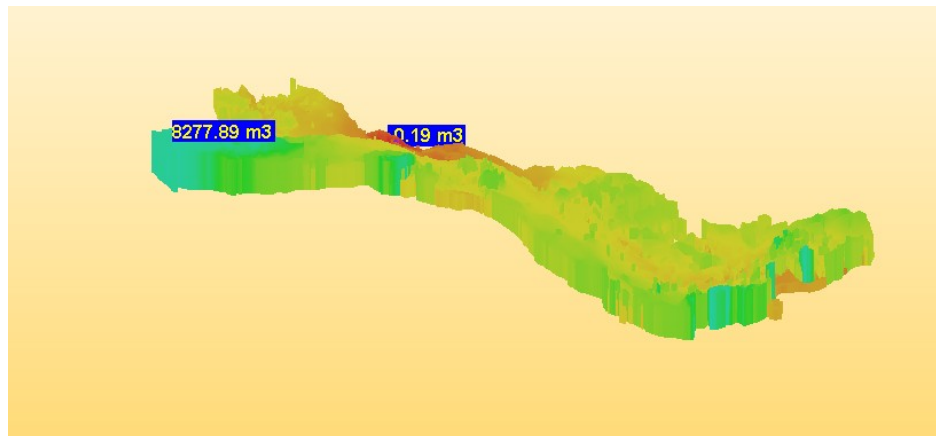


Figure n°29 : *Volume salle rouge, capture d'écran.*

Le volume se calcule à partir d'un plan. Pour les salles rouges, on a environ 8200m³. Ces chiffres sont indicatifs et non exacts, car ils varient à chaque fois que le plan change. Mais on retombe à chaque fois environ à 8000m³.

J'ai effectué cela pour toutes les pièces de la grotte (Cf annexe).



### Le calcul de distance :

Une des informations importantes que voulait savoir Mr Bourges, c'est la distance qu'il y a entre la surface et les différentes salles. Pour ce faire, les fois précédentes, l'extérieur avait été scanné. Le fait de connaître combien d'espace il y a entre le plafond des salles et la surface, aide à comprendre la climatologie de la grotte ainsi que son histoire. Il est plus simple de comprendre les remplissages argileux si l'on connaît mieux où se trouve la surface. De même, il y a des alcôves dans les salles, qui peuvent se situer non loin d'autres salles, ou bien des cônes d'éboulis qui sont très proches de la surface. Grâce à ces informations, il est plus simple de dresser un portrait au plus juste de l'histoire de la grotte. Donc pour Mr Bourges, d'adapter au mieux son suivi environnemental afin de préserver les peintures, et les formations karstiques.

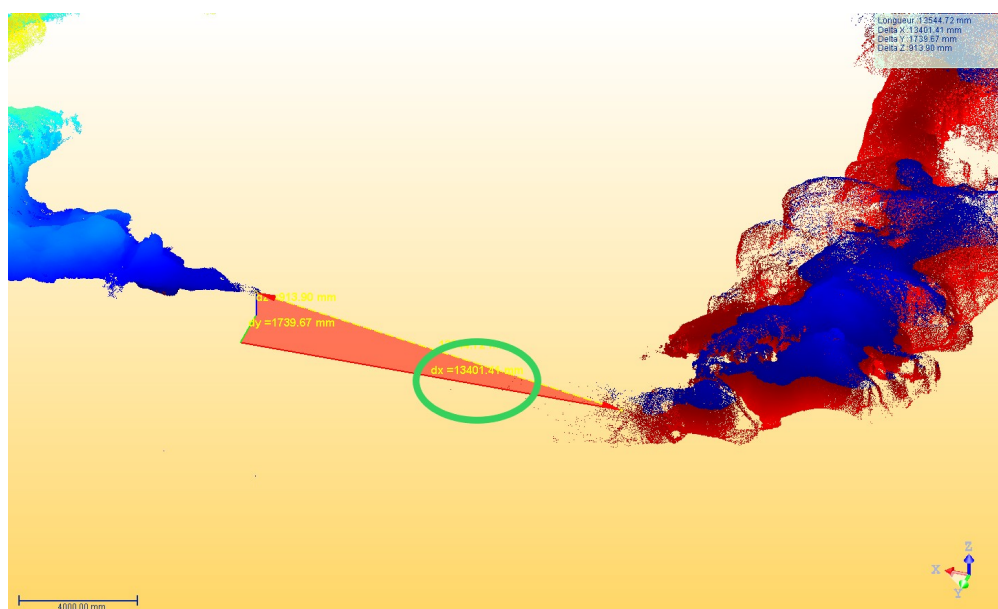


Figure n°30 : *Calcul de distance, capture d'écran*

Sur la figure ci-dessus, on peut voir que les deux alcôves du Combel ne sont qu'à environ 13m de distance. Il se pourrait qu'avant les remplissages argileux ces deux boyaux communiquaient. De plus, des deux côtés se trouvent des peintures, alors c'est une zone d'intérêt archéologique.

### Les courbes de niveau :

La grotte du Pech-Merle a subi des remplissages argileux, cela se voit au niveau des parois dû aux dépôts, grâce à certaines formations de calcite, et grâce aux lapiaz de voûte. Une des fonctions intéressante de ce logiciel, est que l'on peut découper la grotte en courbes de niveau. Cela est utilisé si l'on veut avoir une idée du dénivelé négatif et positif à partir d'un point donné.

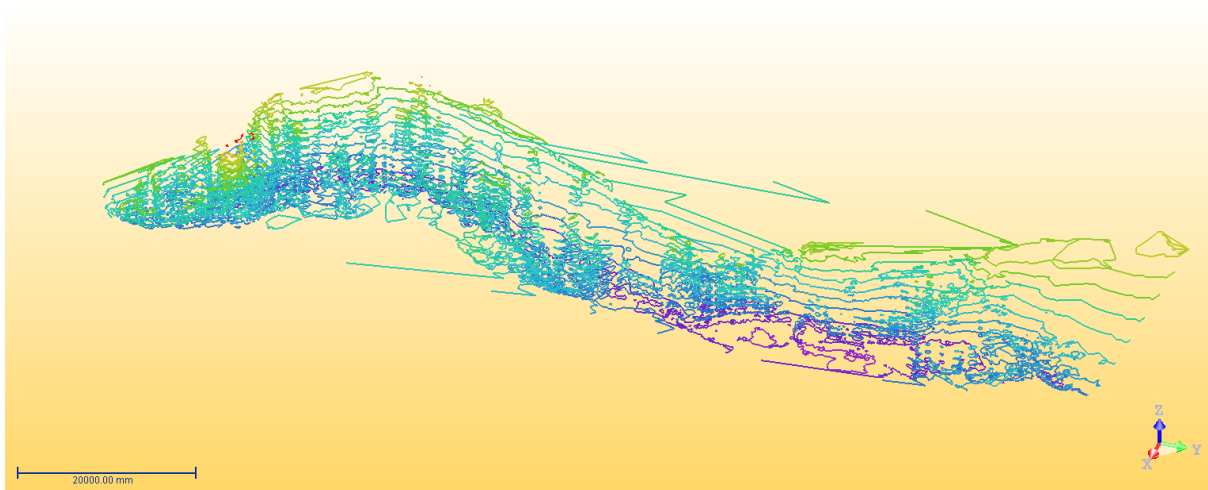


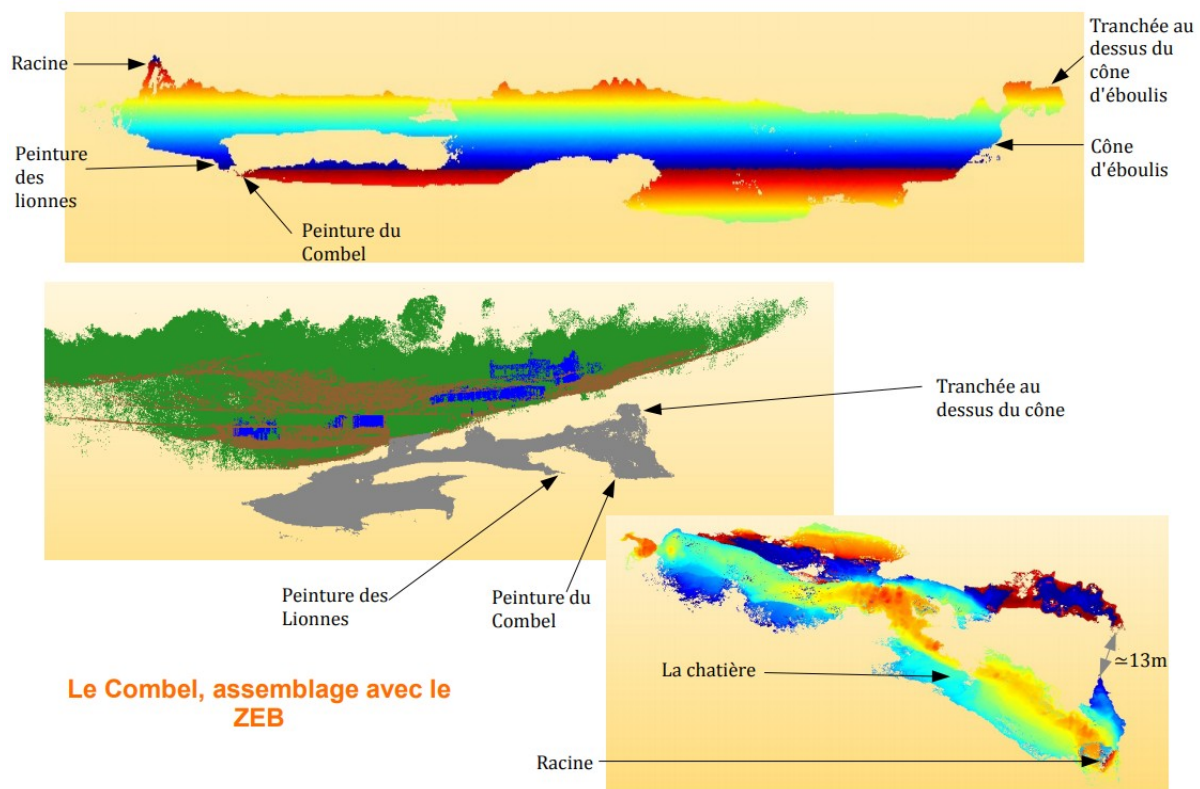
Figure n°31 : *Les salles rouges en courbe de niveau, capture d'écran*  
C'est une fonction que j'ai peu utilisé.

Durand le traitement des données, j'ai produit quelques documents, pour donner des informations aux membres de l'équipe.

#### Scan de l'extérieur, classification automatique



Figure n°32 : *Classification de l'extérieur, production personnelle*  
Sur la figure plus haut, j'ai pu effectuer une classification, où il apparaît juste les bâtiments et le sol, j'ai masqué la végétation, pour les bâtiments soient bien visibles.



**Le Combelle, assemblage avec le ZEB**

Figure n°33 : *Production personnelle*

Ici, la classification de l'extérieur est faite avec la végétation. On remarque que le cône d'éboulis situé au fond de la salle du Combelle se situe proche de la surface. Les autres productions se trouvent en annexe.

## VI- Discussion

Les sites karstiques protégés sont à l'étude depuis un temps relativement court, les études montrent que des questions restent toujours sans réponse (inversion climatique, variation de CO<sub>2</sub>, etc). En fonction des cavités, la climatologie peut totalement différer. Les archéologues sont aussi des utilisateurs des outils 3D.

C'est en utilisant les modèles 3D acquis que l'équipe des deux sites espèrent trouver des réponses.

Pour le gouffre d'Esparros, François Bourges cherche à savoir si la ligne de cassure de l'aragonite suit un parallèle à la hauteur tout au long du gouffre. Savoir cela, lui permettrait de valider une hypothèse, et de mieux adapter les techniques de préservation.

Scanner la grotte du Pech-Merle en 3D, peut avoir de multiples fonctions. Tout d'abord connaître les volumes, les hauteurs, tous ce qui peut servir pour l'aérodynamique. Ce modèle 3D peut aussi servir en cas de création de réalité virtuelle, afin de proposer une expérience virtuelle aux personnes handicapées ne pouvant la visiter. Cela peut aussi servir en cas de danger pour les peintures dû aux visites ou autres...

L'utilisation de la 3D dans le monde souterrain est un outil avec lequel les futurs spécialistes karstiques doivent savoir se servir. Dans un monde où l'aspect visuel est de plus en plus important.

Nos résultats sont un bon exemple d'utilisation de la 3D, car même si elle est de plus en plus utilisée, cette démarche scientifique est encore assez minoritaire.

## Conclusion

L'utilisation de la 3D à des fins scientifiques de conservation, est un bon espoir de croire que les générations futures pourront se trouver face à des magnifiques peintures rupestres. Ces dernières m'ont procuré une multitude de sentiments magnifiques, et beaucoup d'émotion. Ils pourront admirer des cristaux d'aragonites, des disques en calcites, et ressentir ce que Norbert Casteret a lui même ressenti face aux magnifiques créations de la nature.

Aujourd'hui, bon nombre de réseaux karstiques devraient être modélisés, afin de créer une cartographie souterraine complète, avec des données exactes de profondeur. Cette nature est moins valorisée que la nature extérieure. Le monde souterrain est quelque peu oublié par notre gouvernement. La pratique de la spéléologie est peu valorisée, et méconnue, je pense que le monde souterrain a beaucoup de valeur scientifique et historique.

Ce stage m'a permis de faire mes premiers pas dans l'univers des scanners 3D terrestre, de type Lidar. Cette expérience m'a fait comprendre que savoir utiliser les outils 3D est une compétence à maîtriser, notamment dans le domaine des SIG où les cartographies en 3D sont de plus en plus présentes.

Aujourd'hui, il reste encore des découvertes à faire en milieu souterrain, et il faudra préserver ces espaces. C'est un secteur en éveil.

## Liste des figures :

- Figure n°1 : Aiguille d'aragonite, photo personnelle
- Figure n°2 : Maquette de Robert Oedl, récupérer sur le site <http://docplayer.fr/68815691-Une-breve-histoire-de-la-3d-en-grotte.html>
- Figure n°3 : Logo du Bureau d'étude
- Figure n°4 : Logo du laboratoire GET, capture d'écran
- Figure n°5 : Plan d'accès <http://www.pechmerle.com/>
- Figure n°6 : Les chevaux de Pech-Merle, photo de Sébastien Chastanet (OMP)
- Figure n°7 : Carte de situation, <http://www.lesneufcerisiers.eu>
- Figure n°8 : Schéma de cassure de l'Aragonite, photo personnelle
- Figure n°9 : Tableau des paramètres du scanner, <http://www.axxess-solutions.com/scanner-laser-3d-trimble-tx8.html#MwkIDKcj>
- Figure n°10 : Scanner Trimble, photo personnelle
- Figure n°11 : Schéma du principe des sphères, réalisation personnelle
- Figure n°12 : Une sphère, photo personnelle
- Figure n°13 : Tableau de paramètre du scanner Zeb, <https://shop.laserscanning-europe.com/Louer-un-ZEB-REVO-scanner>
- Figure n°14 : Scanner Zeb <https://shop.laserscanning-europe.com/Louer-un-ZEB-REVO-scanner>
- Figure n°15 : Scanner Zeb <https://shop.laserscanning-europe.com/Louer-un-ZEB-REVO-scanner>
- Figure n°16 : Menu du logiciel, photo personnelle
- Figure n°17 : Capture d'écran du logiciel
- Figure n°18 : Logiciel Realcolor, capture d'écran
- Figure n°19 : Capture d'écran de la frise des chevaux colorés
- Figure n°20 : Production personnelle montrant les salles de la grotte du Pech-Merle
- Figure n°21 : Photo du schéma des stations et des sphères réalisés par Stéphane Bonnet lors de la session
- Figure n°22 : Capture d'écran, menu recalcr par cible
- Figure n°23 : Capture de la fenêtre des cibles
- Figure n°24 : Capture d'écran d'un essaie de recalage à partir de l'escalier
- Figure n°25 : Capture d'écran d'un essaie de recalage à partir de l'escalier
- Figure n°26 : Capture d'écran d'un essaie de recalage à partir de l'escalier
- Figure n°27 : Capture d'écran montrant le menu de recalage à partir d'un nuage
- Figure n°28 : Maillage à 1000, capture d'écran
- Figure n°29 : Volume salle rouge, capture d'écran.
- Figure n°30 : Calcul de distance, capture d'écran
- Figure n°31 : Les salles rouges en courbe de niveau, capture d'écran
- Figure n°32 : Classification de l'extérieur, production personnelle
- Figure n°33: Production personnelle
- Figure n°34: Production personnelle

Figure n°36 : Production personnelle

Figure n°37 : Capture d'écran, salle rouge coupé chaque 5m

Figure n°38 : Une coupe de la salle rouge

Figure n°39 : Un membre de l'équipe avec le scanner Zeb dans les mains. Photo de Sébastien Chastanet.

Figure n°40 : Grotte entière, vue de gauche, capture d'écran

Figure n°41 : Utilisation du scanner Trimble, avec 3 membres de l'équipe (Camille, Léopold, et Stéphane), photo de Sébastien Chastanet

## Bibliographie

### Articles :

Banaszak & M. K, *SIG et 3D au service des collectivités territoriales : l'expérience de la ville du Havre*, 9 p., Revue XYZ – N°114 – 1er Trimestre 2008.

Yves Billaud , Bertrand Chazaly , Michel Olive et Luc Vanrell , *Acquisition 3D et documentation multiscalaire de la grotte Cosquer : une réponse aux difficultés d'accès et à une submersion inéluctable*, *KARSTOLOGIA*, Fédération Française de Spéléologie et Association Française de Karstologie, 2015, Karst, grottes et 3D, 1 (63)

Albane Burens-Carozza, Francois Leveque, Pierre Grussenmeyer, Laurent Carozza, Delphine Lacanette, Yves Billaud, Samuel Guillemain, Vivien Mathé, Raphaëlle Bourrillon, Stephane Petrognani, Carole Dudognon, *Apports de la numérisation 3D multi-échelle à l'étude intégrée de la grotte ornée des Fraux (Dordogne)*, *KARSTOLOGIA*, Fédération Française de Spéléologie et Association Française de Karstologie, 2015, Karst, grottes et 3D, 1 (63)

Jean-Jacques Delannoy, Benjamin Sadier, Serge Valcke, José Peral, Guy Perazion, Stéphane Jaillet, Gilles Tosello, Jean-Michel Geneste et Jean Clottes, *La modélisation 3D, outil de transfert des connaissances Exemple de la réplique de la grotte Chauvet Pont d'Arc: la caverne du Pont d'Arc (Ardèche, France)*, *KARSTOLOGIA*, Fédération Française de Spéléologie et Association Française de Karstologie, 2015, Karst, grottes et 3D, 1 (63)

Stéphane Jaillet, Benjamin Sadier, , Guy Perazio et Jean-Jacques Delannoy, *Une brève histoire de la 3D en grotte*, *KARSTOLOGIA*, Fédération Française de Spéléologie et Association Française de Karstologie, 2015, Karst, grottes et 3D, 1 (63)

Delphine Lacanette et Philippe Malaurent, « *La 3D au service de la conservation des grottes ornées, l'exemple de Lascaux et du simulateur Lascaux* », In Situ [En ligne], 13 | 2010, mis en ligne le 16 avril 2012

Arnauld Malard, Pierre-Yves Jeannin, Éric Weber, Jonathan Vouillamoz, Demian RICKERL et Urs Eichenberger, « *Apport des outils 3D pour la caractérisation des aquifères karstiques: l'approche KARSYS* » ISSKA, Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, La Chaux-de-Fonds. Revue *KARSTOLOGIA*, Fédération Française de Spéléologie et Association Française de Karstologie, 2015, Karst, grottes et 3D, 1 (63)

Pancza André, *Les moulins souterrains du Col-des-Roches*, Institut de Géographie, Université de Neuchâtel, CH – 2000 Neuchâtel

Guillaume Rongier, Pauline Collon-Drouaillet, Marco Filipponi. *Simulation of 3D karst conduits with an object-distance based method integrating geological knowledge*. *Geomorphology*, Elsevier, 2014, 217, pp.152-164

Christophe Siart, Matthieu Ghilardi, Markus Forbriger et Katerina Theodorakopoulou, « *Terrestrial laser scanning and electrical resistivity tomography as combined tools for the geoarchaeological study of the Kritsa-Latô dolines (Mirambello, Crete, Greece)* », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 18 - n° 1 | 2012, 59-74.

Gérard Subsol Benjamin Moreno Jean Pierre Jessel José Braga Laurent Bruxelles Francis Thackeray Ron Clarke, *In situ 3D Digitization of the "Little Foot" Australopithecus skeleton from Sterkfontein*, *Paleoanthropology*, Paleoanthropology Society, 2015, pp.44-5

Tacchini Pascal *Cavités et phénomènes karstiques dans la région du cirque glaciaire de Salanfe, Valais (Suisse)*, Groupe de Spéléologie Rhodanien Rte des Falaises 18, CH – 3960 Sierre, *Géomorphologie et Tourisme*, septembre 2001

Matthieu Thomas, Stéphane Jaillet, Johan Berthet, Didier Cailhol, Bernard Fanget, Gabriel Hez, Emmanuel Malet et Benjamin Sadier, *Analyse 3D de la conservation du remplissage détritique de la grotte Roche (Vercors, France)*, *KARSTOLOGIA*, Fédération Française de Spéléologie et Association Française de Karstologie, 2015, *Karst, grottes et 3D*, 1 (63)

Sophie Viseur, Johan Jouvès, Arnaud Fournillon, Bruno Arfib, Yves Guglielmi. *3D stochastic simulation of caves: application to Saint-Sébastien case study (SE, France)*. *KARSTOLOGIA*, Fédération Française de Spéléologie et Association Française de Karstologie, 2015, *Karst, grottes et 3D* (2) (64), pp.17-24.

Thèse :

Modélisation et validation d'un système d'information géographique 3D opérationnel, F.RAMOS, UMVL, soutenue le 05/05/03.



## Annexes

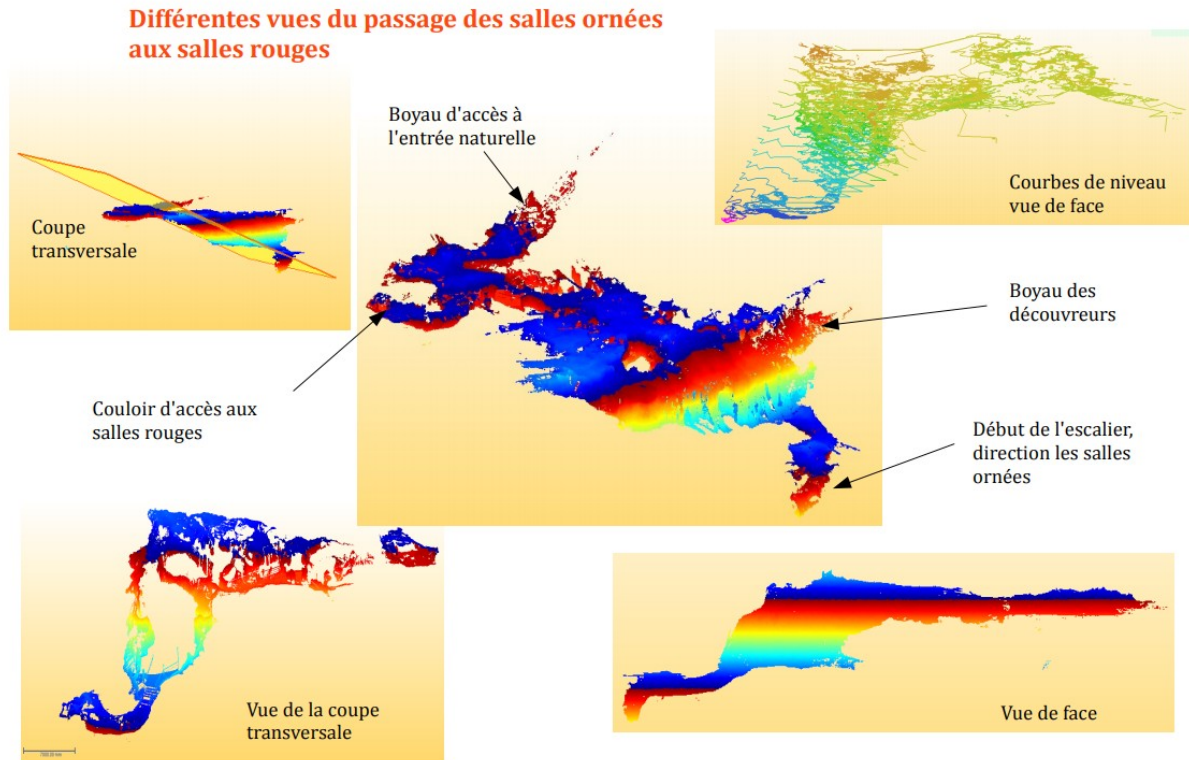
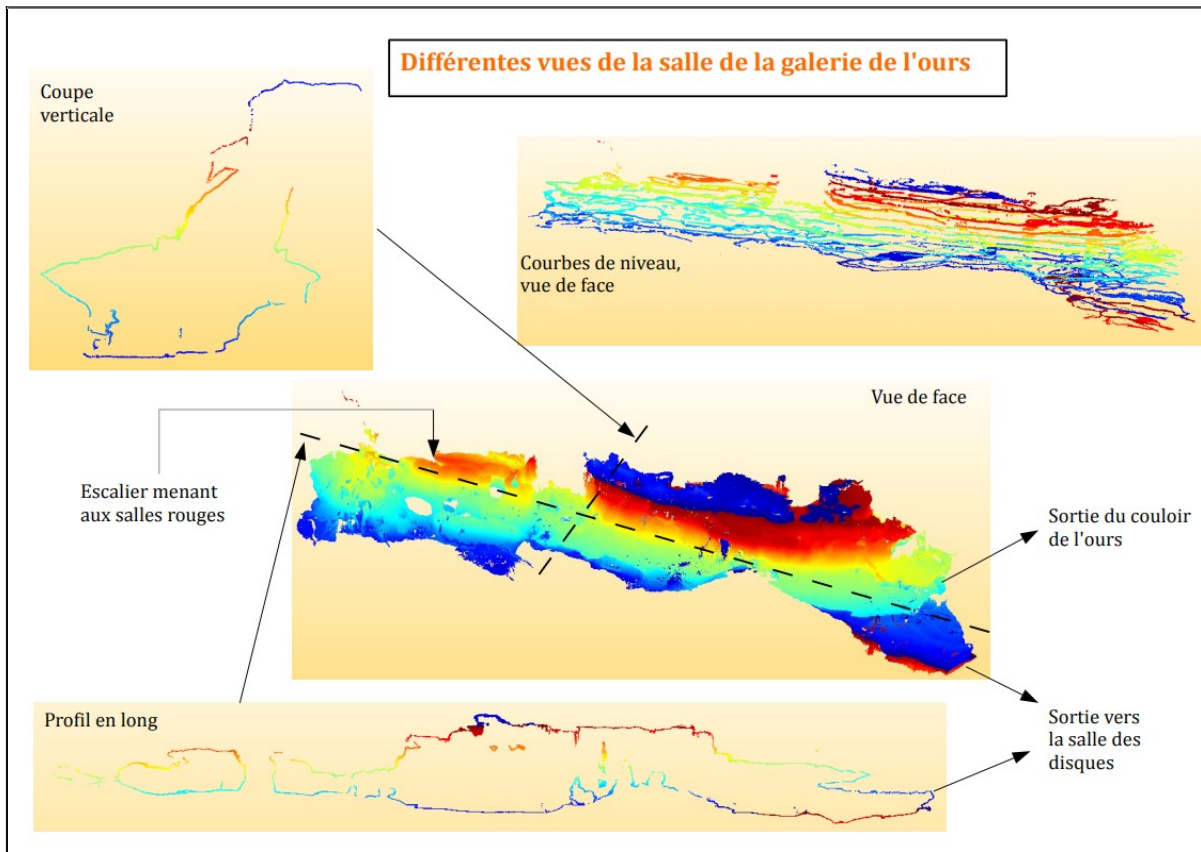


Figure n°34 : *production personnelle*



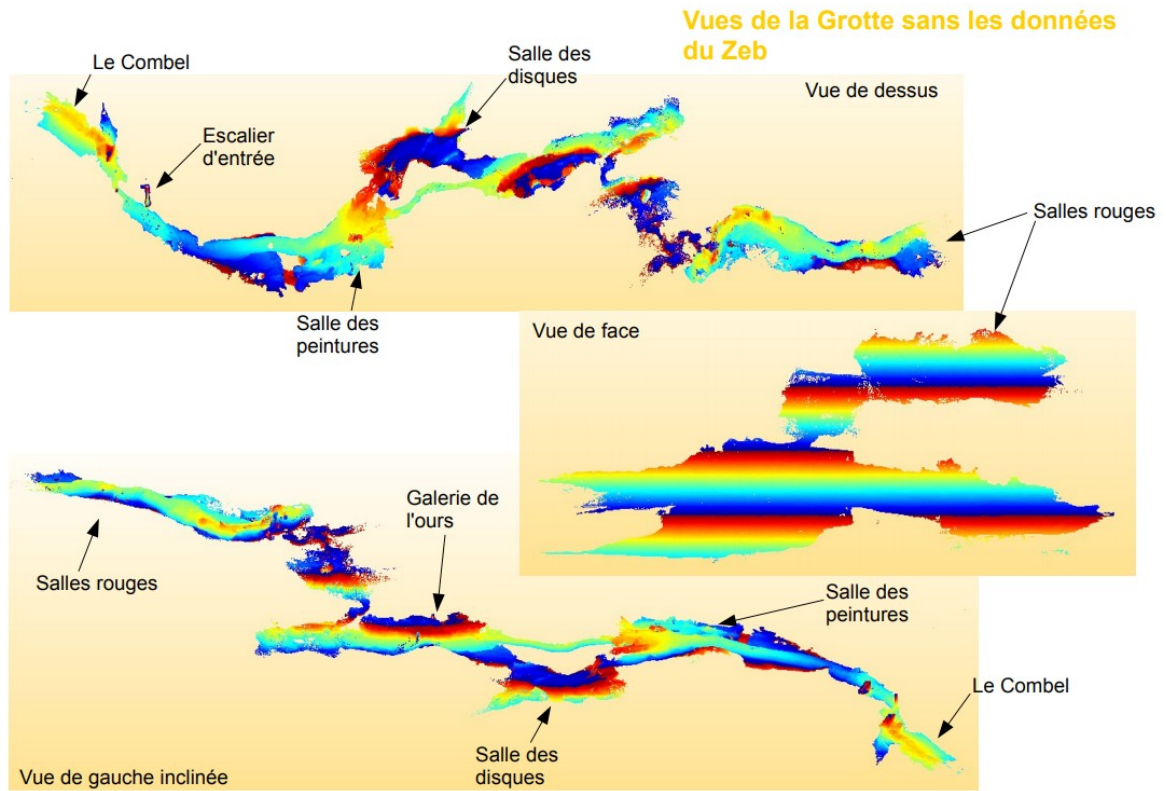


Figure n°36 : *production personnelle*

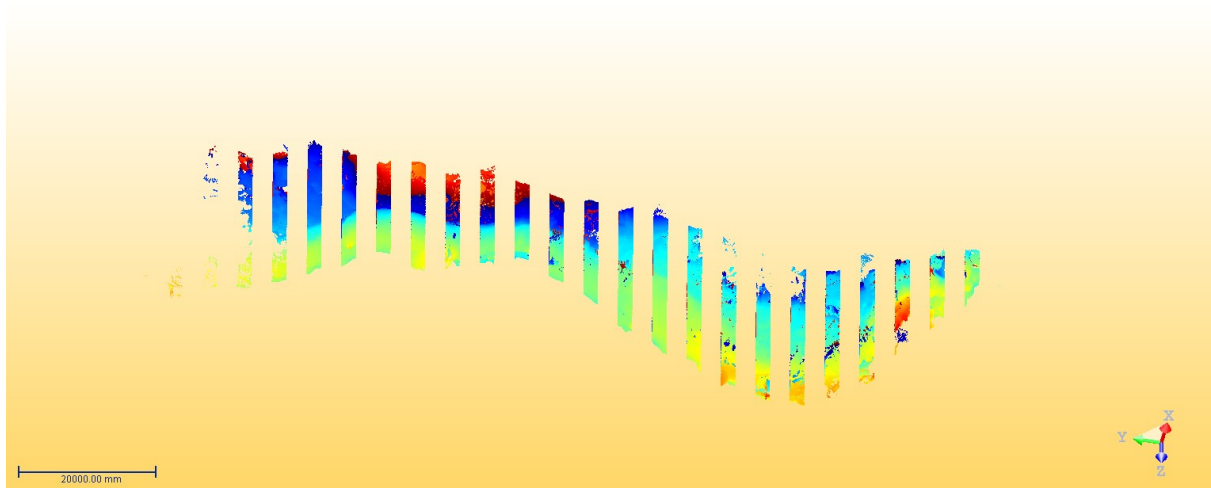


Figure n°37 : *Capture d'écran, salle rouge coupé chaque 5m*

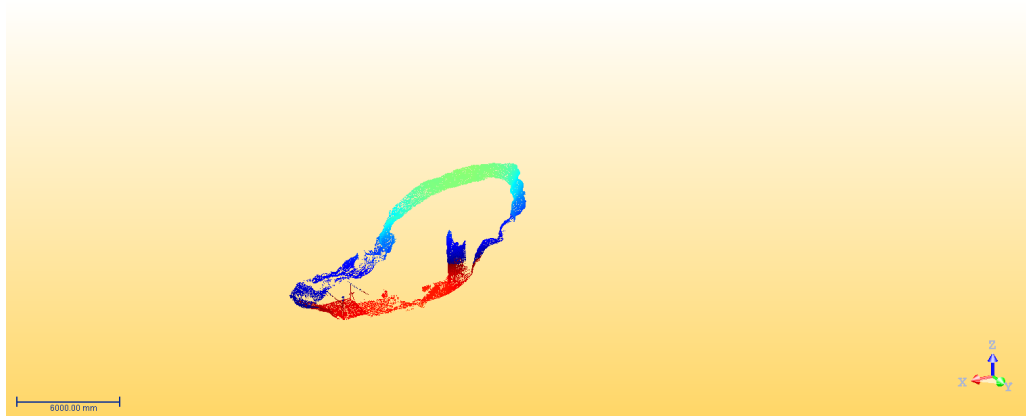


Figure n°38 : *Une coupe de la salle rouge*



Figure n°39 : *Un membre de l'équipe avec le scanner Zeb dans les mains. Photo de Sébastien Chastanet*

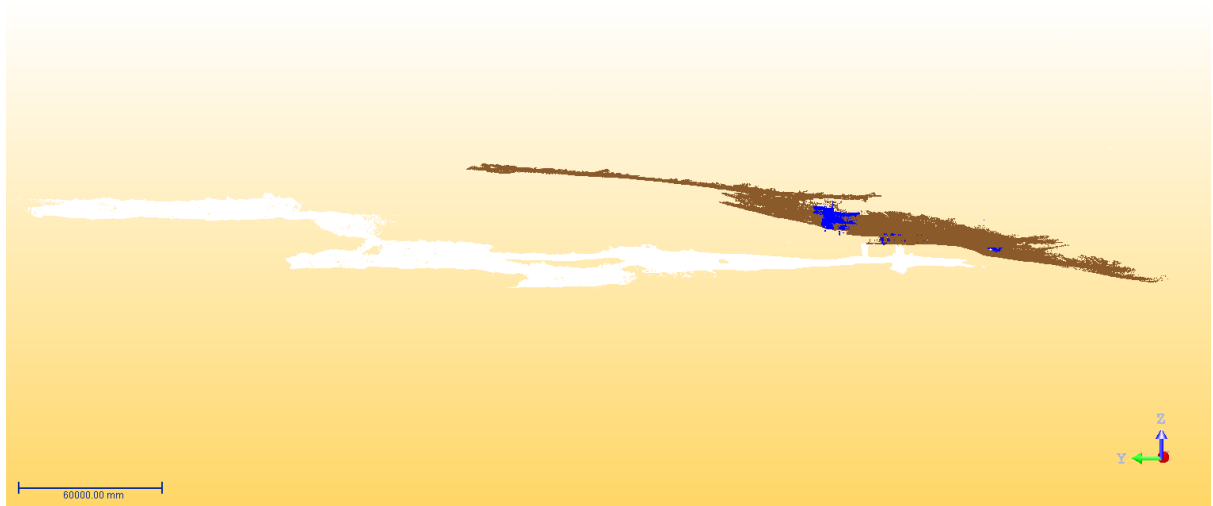


Figure n°40 : *Grotte entière, vue de gauche, capture d'écran*



Figure n°41 : *Utilisation du scanner Trimble, avec 3 membres de l'équipe (Camille, Léopold, et Stéphane), photo de Sébastien Chastanet*

## Résumé

“Vers de grandes choses par des voies étroites” devise de Norbert Casteret. Le monde souterrain est une mine de richesses naturelles, archéologiques, historiques, qu’il faut préserver. L’écosystème souterrain est fragile, le climat est très sensible à toute variation, et change en fonction des cavités. C’est un monde encore très peu connue, et une multitude de questions restent en suspens. Le bureau d’étude Géologie Environnement Conseil m’a prise en stage, en collaboration avec le laboratoire GET ; nous avons scanné en 3D deux cavités : la grotte du Pech-Merle et le gouffre d’Esparros. Deux scanners ont été utilisés : Le scanner Trimble qui a une grande précision et s’emploie sur pied, et le scanner Zeb portatif d’une moindre précision mais plus pratique pour scanner les boyaux. Scanner en 3D permet d’obtenir des mesures de volume, des distances exactes (extérieur-salle), des coupes 3D, pour comprendre la formation de la grotte, les remplissages argileux. Toutes ces informations vont aider le bureau d’étude à mieux comprendre le climat de la grotte, l’aérologie, dans le but d’adapter les méthodes de conservation et préservation du lieu. L’assemblage des données 3D se fait sous le logiciel Realwork. Une fois l’assemblage réalisé, on calcule le volume des salles, les distances et on crée des supports visuels. L’utilisation de scanner Lidar 3D dans une grotte est un acte scientifique récent et novateur.

## Abstract

"Norbert Casteret's motto: "Towards great things in narrow paths". The underground world is a mine of natural, archaeological and historical wealth that must be preserved. The ecosystem is fragile, the climate is very sensitive to any variation, and changes according to the cavities. It is a world that is still very unknown, and a multitude of questions remain unanswered. The Geology Environnement Conseil design office took me on an internship and in collaboration with the GET laboratory, we scanned two cavities in 3D: the Pech-Merle cave and the Esparros abyss. This thanks to two scanners: The Trimble scanner with high precision, which is used on a stand, and the portable Zeb scanner, with lower precision but practical for scanning narrow areas. 3D Scanner allows to obtain volume measurements, exact distances (outside - room), 3D cuts, to understand the formation of the cave, clay fillings. All this information will help the design office to better understand the climate of the cave, the aerology, in order to adapt their conservation and preservation methods. The 3D data is assembled using Realwork software. Once assembled, we calculate the volume of the rooms, the distances, we create visual supports. The use of a 3D Lidar scanner in a cave is a recent and innovative scientific act.