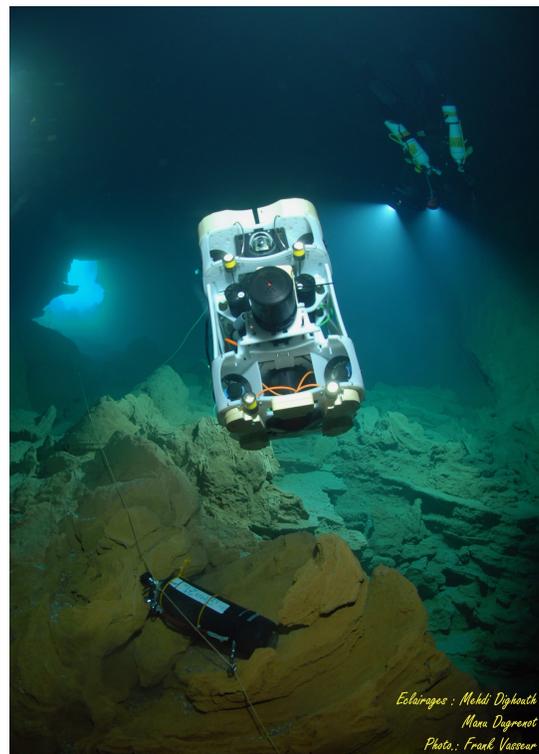




Projet ALEYIN

Exploration robotique d'environnements aquatiques confinés

Première expérimentation : Cartographie de l'exsurgence de Gourneyras



13 et 14 juillet 2016

A. Lasbouygues et L. Lapierre

1 Introduction

Les réservoirs souterrains représentent l'une des principales sources d'accès à l'eau douce dans le monde. Les aquifères karstiques constituent l'un des principaux points d'accès à ces ressources notamment dans des zones, telles que le bassin karstique méditerranéen, où l'eau douce est une ressource rare. Néanmoins, ces ressources sont à l'heure actuelle largement sous-exploitées.

En effet, la structure complexe des aquifères karstiques leur confère un comportement hydrodynamique spécifique qu'il est indispensable de comprendre afin d'assurer une exploitation durable et efficace de la ressource en eau. Ces aquifères, remplis par ruissellement de l'eau dans des roches poreuses, sont en outre très sensibles à la pollution.

Développer des solutions de collectes de données efficaces dans de tels environnements s'avère donc indispensable afin de fournir aux experts du milieu (hydrogéologues) et aux instances décisionnaires chargées de la gestion de la ressource en eau les informations nécessaires pour comprendre ces environnements et mettre en place des politiques de gestion de l'eau adéquates.

Les solutions actuelles sont limitées. En effet, le gros des relevés est constitué de levées topographiques effectuées manuellement par les plongeurs. Or dans des environnements aussi complexes et dangereux, ces relevés sont à la fois fastidieux et risqués. De plus, ces solutions sont de plus en plus limitées par les interdictions de plongées frappant de nombreux aquifères suite aux accidents qui endeuillent chaque année la communauté des plongeurs souterrains.

Les robots présentent donc une solution alternative pertinente pour répondre à ces limitations et notamment afin de caractériser les ressources en eau dans les parties les plus profondes des réseaux karstiques.

Dans le cadre du projet ALEYIN, l'équipe Explore du LIRMM et ses partenaires travaillent sur le développement de deux systèmes de cartographies d'environnements karstiques afin d'apporter une solution à la fois et à court et à long terme aux limitations des techniques actuelles de caractérisation des environnements karstiques.

Le premier système est le ROV Ulysse qui est le premier d'un robot d'exploration karstique développé au LIRMM. Le second système est le Navscoot, développé en partenariat avec la société Syera. Ce système permet l'emport du système de cartographie du robot sur un scooter sous-marin dirigé par un plongeur.

Dans ce contexte, ce rapport présente les principaux résultats de l'expérimentation réalisée les 13 et 14 juillet dans l'exsurgence de Gourneyras. Cette mission a été réalisée pour atteindre les objectifs suivants :

- Preuve de concept : Démontrer la pertinence de nos solutions de collecte de données et de cartographie en milieu karstique.
- Identification des axes de développement : Identifier les limitations des technologies actuelles pour l'évolution dans un milieu confiné chaotique et vérifier la corrélation entre ces axes de développement et les problématiques scientifiques et technologiques mises en avant dans le cadre du projet ALEYIN.
- Collecte de données : Acquérir des données en environnement réel qui nous permettront d'évaluer les solutions technologiques proposées dans le cadre du projet ALEYIN.

2 Equipe

L'équipe du LIRMM impliquée dans cette mission était constituée de 4 personnes : Lionel Lapierre, Adrien Lasbouygues, tous deux chercheurs qui travaillent sur la partie scientifique du projet, Silvain Louis, doctorant en robotique sous-marine, et Adrien Gomez chargé de la documentation photo et vidéo de la mission.

Cette équipe était épaulée par Benoit Ropars pour la société REEDS, spin-off issue du LIRMM pour la valorisation des travaux qui y sont menés, et Luc Rossi pour la société Syera, partenaire technique du projet.

Cette mission s'est déroulée avec le soutien d'une équipe de plongeurs de l'association PlongéeSout. Leur rôle était d'assurer la sécurité du robot durant cette première mission, de piloter le scooter sous-marin lors d'une plongée et de documenter le déroulement de la mission. Ils nous apportent également leur expertise précieuse sur les aquifères karstiques issue de nombreuses années de plongées dans de tels milieux.



FIGURE 1 – Les équipes du LIRMM et de PlongéeSout.

3 Site Expérimental

Notre expérimentation s'est déroulée dans l'exsurgence¹ de Gourneyras, située sur la commune de Saint-Maurice-Navacelles dans l'Hérault. Les explorations de la source ont commencé en 1950 et, à ce jour, elle a été explorée sur une distance de 2210 mètres.

Ce site expérimental a donc été choisi pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les plongeurs de PlongéeSout qui nous ont accompagnés sur cette mission connaissent bien le site et peuvent

1. Une exsurgence est une sortie à l'air libre d'écoulements souterrains provenant de l'infiltration des eaux de pluie

donc à la fois anticiper les difficultés liées à l’environnement mais également nous fournir leur retour sur les données collectées par nos systèmes afin d’en évaluer la pertinence.

De plus le volume relativement important de la galerie d’entrée (jusqu’à environ 10 mètres de largeur) permet au robot et aux plongeurs d’évoluer ensemble dans l’environnement facilitant les prises de vues et permettant aux plongeurs de rester proche du robot et donc de pouvoir intervenir rapidement en cas de problème. Ce volume facilite également l’accès du robot à la galerie depuis la vasque d’entrée.

Enfin, la complexité structurelle de la galerie (éboulements, formations rocheuses chaotiques) présente les caractéristiques typiques des aquifères karstiques.

Néanmoins l’accès au site expérimental en lui-même reste difficile et représente, là encore, un aperçu assez fidèle des conditions d’accès à ce type d’exurgences. La Figure 2 présente une vue panoramique de la vasque d’entrée. On peut noter que celle-ci est constituée de nombreux éboulis rocheux instables, compliquant fortement le déplacement de matériel lourd. De plus, le matériel doit être descendu sur le site depuis le chemin d’accès par la civière visible sur la gauche de l’image. Dans ce contexte, notre choix d’utiliser un robot aux dimensions réduites et nécessitant une logistique de déploiement légère s’est avéré pertinent. En effet, un engin plus encombrant aurait été très difficile à mettre en œuvre dans un tel environnement.



FIGURE 2 – Vasque d’entrée de l’exurgence vue depuis la surface. (Crédits Photos : Adrien Gomez)

Du point de vue technique, la difficulté d’accès à ce type d’environnement permet d’orienter nos choix concernant les futures évolutions de l’architecture mécanique du robot. En effet, le transport, la manipulation et le montage délicat du robot nous incitent à retravailler sur l’architecture mécanique du robot pour les futures versions de notre prototype et à nous orienter tant dans le choix des matériaux que de la structure du robot vers des solutions

privilégiant la robustesse et la simplicité de déploiement.

4 Systèmes mis en œuvre

4.1 Le ROV Ulysse

Le robot mis en œuvre dans le cadre de cette expérimentation est le ROV² Ulysse développé par le LIRMM (cf. Figure 3). D'une largeur de 41cm, d'une longueur de 54cm et d'une hauteur de 68cm, il pèse 45kg en air. Il embarque sa propre réserve d'énergie pour une autonomie de 2h.

Il est équipé d'une centrale inertielle³, d'un capteur de pression permettant d'estimer sa profondeur et d'un capteur de température. Une caméra frontale Haute Définition permet à l'opérateur en surface d'assurer le pilotage du robot.

Le robot embarque également un Loch Doppler, capteur permettant de mesurer les vitesses de translation du robot et ainsi de reconstruire sa trajectoire. Un sonar profilométrique permet de réaliser des mesures de distance selon un angle perpendiculaire à l'axe de progression du robot. Il est visible à l'avant du robot à la Figure 3. Il s'agit d'un capteur essentiel permettant à la fois d'acquérir les données nécessaires à la reconstruction de la galerie mais aussi permettant au robot de détecter les obstacles et d'éviter les parois de la galerie.



FIGURE 3 – Le robot Ulysse dans l'exsurgence de Gourneryras. (Crédits Photos : Frank Vasseur)

Le robot embarque également des cartes électroniques sur lesquelles fonctionnent les logiciels de commande du robot. Ceux-ci permettent au robot d'automatiquement maintenir son orientation spatiale aux valeurs définies par l'opérateur. De plus, il peut, dans le plan du sonar profilométrique, se déplacer automatiquement afin d'éviter les parois de la galerie.

2. Remotely Operated Vehicle

3. Centrale Inertielle : Capteur permettant de mesurer les accélérations linéaires, les orientations spatiales du robot ainsi que les vitesses de rotations.

Enfin le robot est connecté au poste de l'opérateur par un cordon ombilical sur lequel transite les informations issues des capteurs du robot et les consignes transmises par l'opérateur. Dans un souci de déployer une logistique légère, le poste de pilotage est constitué d'un ordinateur qui contient le logiciel chargé de communiquer avec le robot, de stocker les informations recueillies par celui-ci afin de produire les livrables de mission et est équipé d'un joystick permettant le pilotage du robot. Un second ordinateur peut également être connecté au robot afin d'afficher en ligne les informations transmises par le sonar et permettre ainsi de reconstruire en ligne l'environnement comme le montre la Figure 4. Cette fonctionnalité était importante afin de nous permettre de nous assurer en ligne du bon déroulement de la collecte de données. Elle est également importante pour permettre à nos clients et partenaires de suivre en temps-réel le déroulement de la mission.

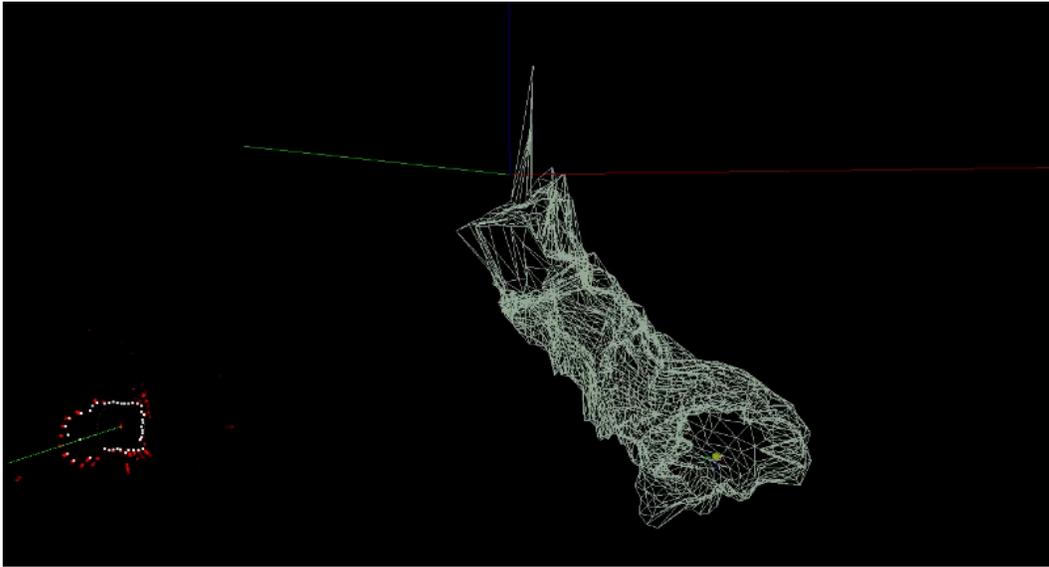


FIGURE 4 – Visuel du logiciel de reconstruction en ligne de l'environnement. En bas à gauche de l'image, nous pouvons voir le profil courant de la galerie issu des mesures du sonar profilométrique.

4.2 Le Navscoot

Le Navscoot est un système de cartographie qui peut être monté sur un scooter sous-marin (cf. Figure 5) développé conjointement avec les sociétés REEDS et Syera.

Il est constitué d'un corps en aluminium porteur des mêmes capteurs (Loch Doppler et Sonar profilométrique) que le robot. Ces derniers sont reliés à une carte électronique qui assure ici le stockage des données pour un traitement hors ligne une fois la mission terminée. Cette carte électronique est couplée à un afficheur permettant au plongeur de visualiser les données de navigation courantes (cap, profondeur, vitesse) ainsi que les données collectées par le robot (notamment le profil courant de la galerie réalisé par le sonar).

L'architecture du Navscoot est présentée sur la Figure 6. Il est à noter qu'il est ici accouplé au scooter Bonex Reference RS⁴, modèle retenu car utilisé par plusieurs plongeurs de l'équipe de PlongéeSout.

4. http://www.bonex-systeme.de/static/reference_rs_e.php



FIGURE 5 – Le Navscoot dans l'exsurgence de Gourneyras. (Crédits Photos : Frank Vasseur)

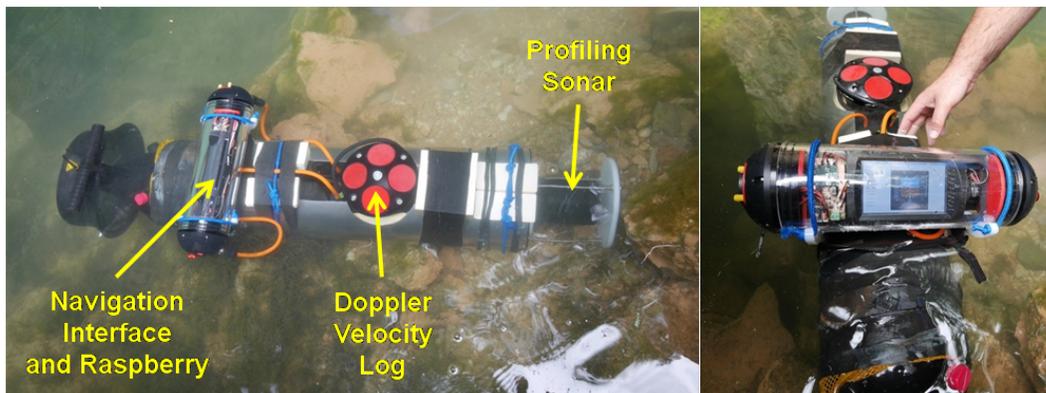


FIGURE 6 – Architecture matérielle du Navscoot. (Crédits Photos : Pedro Balordi)

5 Déroulement de la mission et données récoltées

5.1 Expérimentation du 13 Juillet : Cartographie utilisant le ROV Ulysse

L'expérimentation a consisté en une plongée de 30 minutes qui nous a permis de cartographier la galerie sur 30 mètres. Le robot devait suivre un plongeur "pilote" chargé d'indiquer à l'opérateur l'axe de la galerie. Deux autres plongeurs étaient chargés de surveiller l'ombilical du robot et débloquent le câble si celui-ci venait à se coincer autour de rochers. Enfin le reste de l'équipe assurait la documentation de la mission.

D'une manière globale, le comportement du robot a été satisfaisant. Toutefois, naviguer et se repérer visuellement dans un tel environnement reste difficile. Ainsi même quand il était possible de voir les parois avec la caméra du robot, leur nature chaotique rendait difficile la localisation spatiale de celui-ci. Dès lors, il aurait été très difficile de mener à bien la mission sans l'aide du plongeur "pilote" qui a guidé le robot dans un environnement qu'il connaît parfaitement. En outre, le DVL avait des performances assez pauvres dans l'environnement. De fait, nous n'avons pas pu pleinement activer la fonctionnalité d'évitement automatique de

parois. Elle a ainsi été modifiée pour fournir des indications de déplacement à l'opérateur qui devait s'assurer de leur cohérence avant d'appliquer les actions demandées. Le retour sur ce test s'est révélé positif et nous attendons des améliorations dans les données acquises par le DVL avant de tester cette fonctionnalité de manière complète.

A l'aide des informations recueillies par la centrale inertielle et le Loch Doppler nous avons pu retracer la trajectoire suivie par le robot comme présentée à la Figure 7 ainsi que le profil de plongée qui est mis en comparaison avec celui du plongeur "pilote" à la Figure 8. On peut constater un bruit important sur la trajectoire ainsi qu'un erreur d'environ 2 mètres entre le point de départ et le point retour. Ces deux phénomènes s'expliquent principalement par les faibles performances du DVL lors du déplacement du robot.

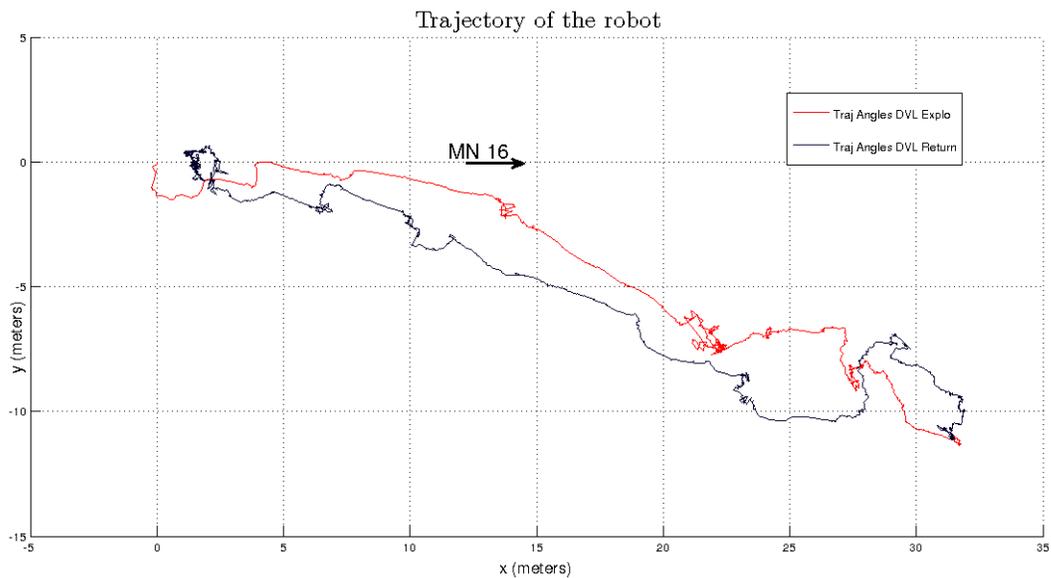


FIGURE 7 – Trajectoire suivie par le robot.

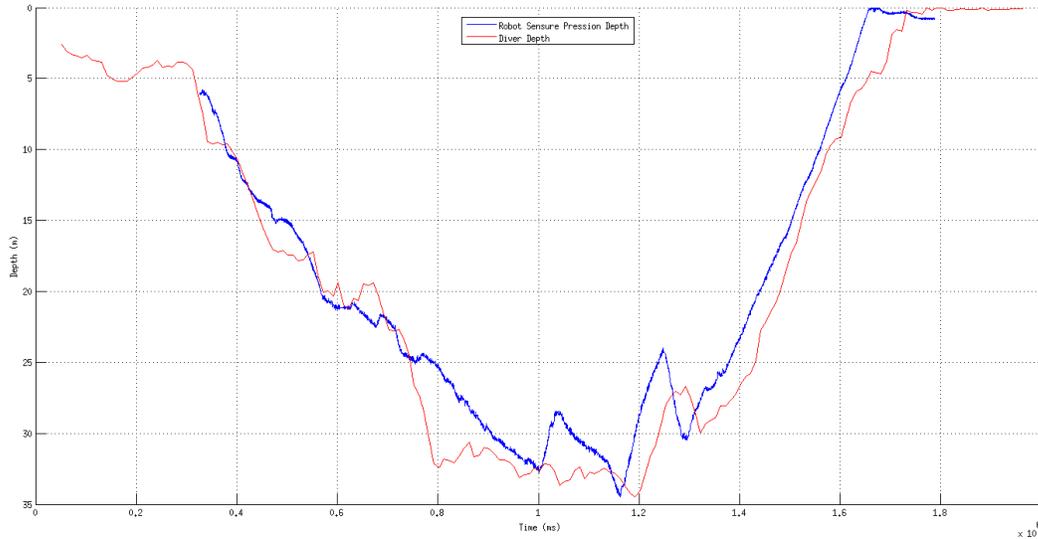


FIGURE 8 – Profil de plongée du robot (courbe bleue) et du plongeur (courbe rouge).

Nous avons également pu reconstituer le modèle 3D de l’environnement à partir des données acquises par le sonar (Figure 9). Dans le contexte de l’expérimentation, le sonar avait une résolution angulaire de 9° et une portée de 10 mètres. La faible résolution angulaire s’explique par l’utilisation du capteur à la fois pour cartographier l’environnement et pour assurer l’évitement de parois. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre la précision de la cartographie et la vitesse de scan.

Ce modèles 3D nous a permis également de proposer une topologie de la galerie d’entrée du gouffre que l’on peut voir en vue de plan (Figure 10) et en vue de coupe (Figure 11). Cette topologie est à comparer à la topologie proposée par F. Vasseur et A. Spenle (Figure 12).

Malgré le peu d’informations disponibles dans la première partie de la topographie des plongeur, on peut voir la consistance des données sur les trente premiers mètres où nous atteignons une profondeur située entre 30 et 35 mètres ce qui est cohérent avec les mesures effectuées par les plongeurs. Sur la topologie des plongeurs, nous pouvons également observer un rétrécissement de la largeur de la galerie à une profondeur d’environ 20 mètres. Nous pouvons observer le même rétrécissement sur la topologie réalisée à partir des mesures du robot et située à environ 20 mètres de l’entrée sur la vue en plan ce qui correspond à une profondeur comprise entre 15 et 20 mètres au centre du conduit ce qui est à nouveau cohérent avec les mesures des plongeurs.

Enfin nous avons pu également estimer le volume de cette partie de la galerie à 1187 mètres cubes.

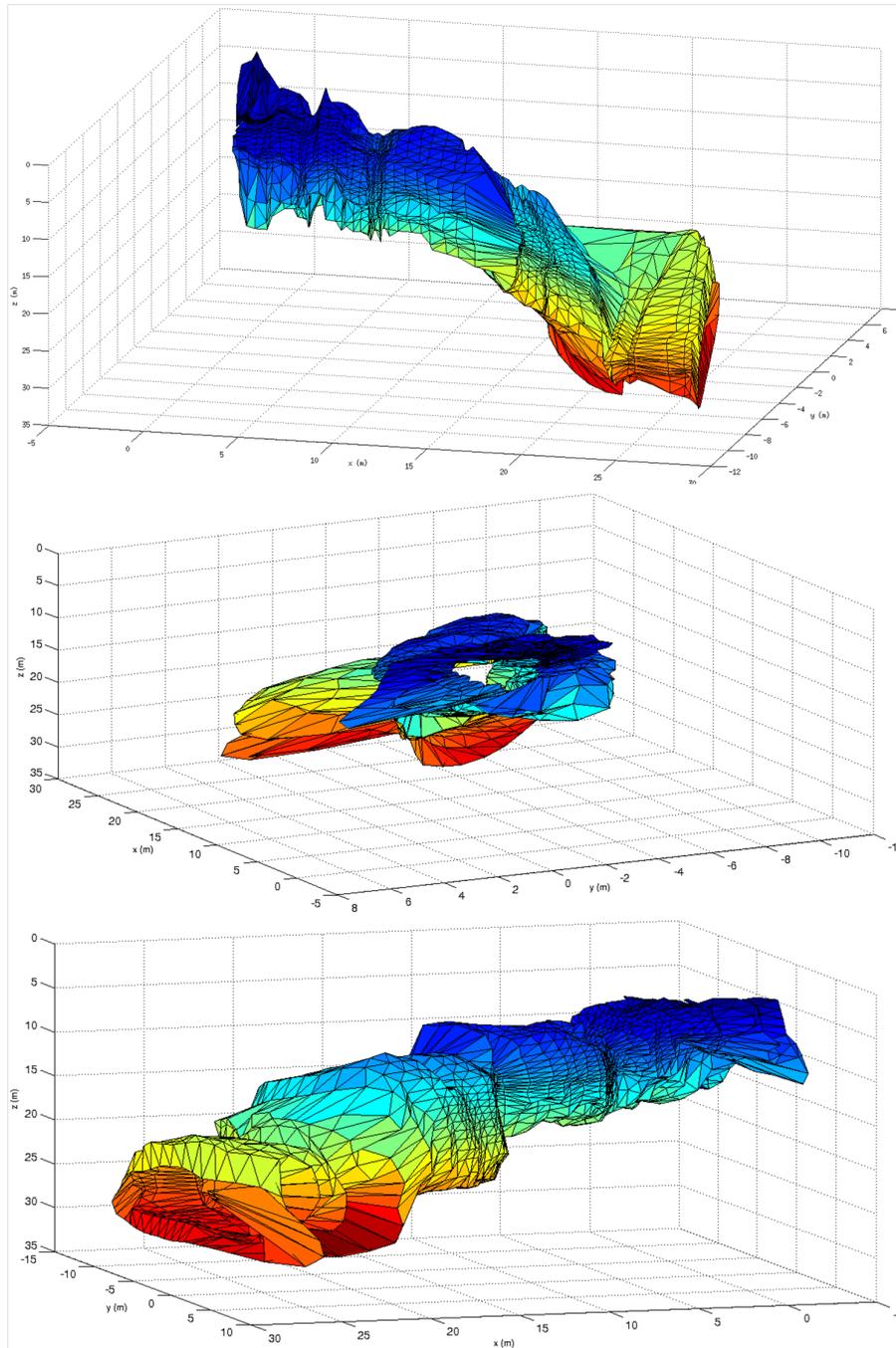


FIGURE 9 – Modèle 3D de la galerie vu sous différents angles.

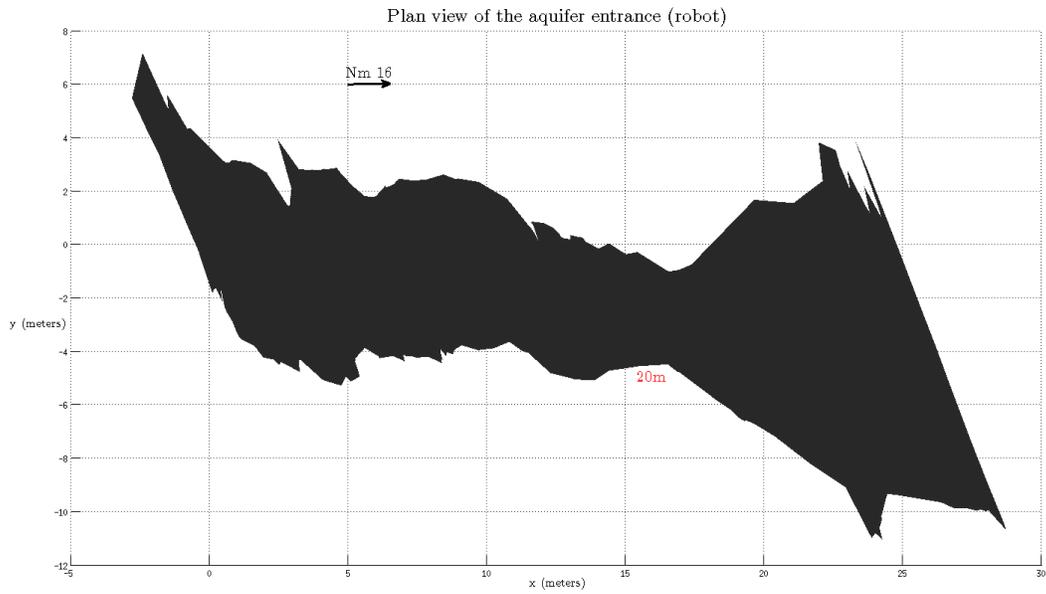


FIGURE 10 – Vue en plan de l’entrée de la galerie cartographiée par le robot.

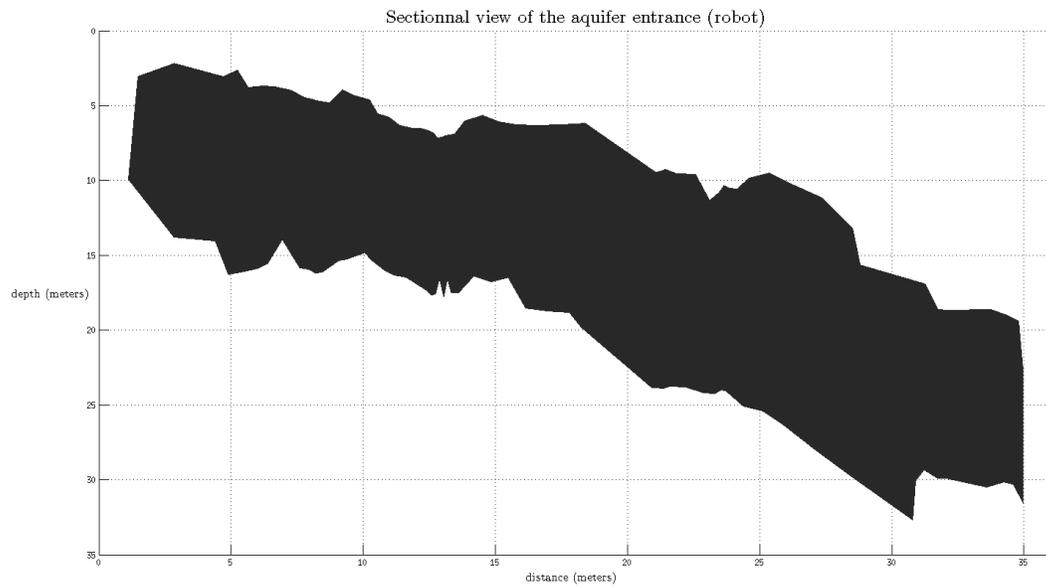


FIGURE 11 – Vue en coupe de l’entrée de la galerie cartographiée par le robot.

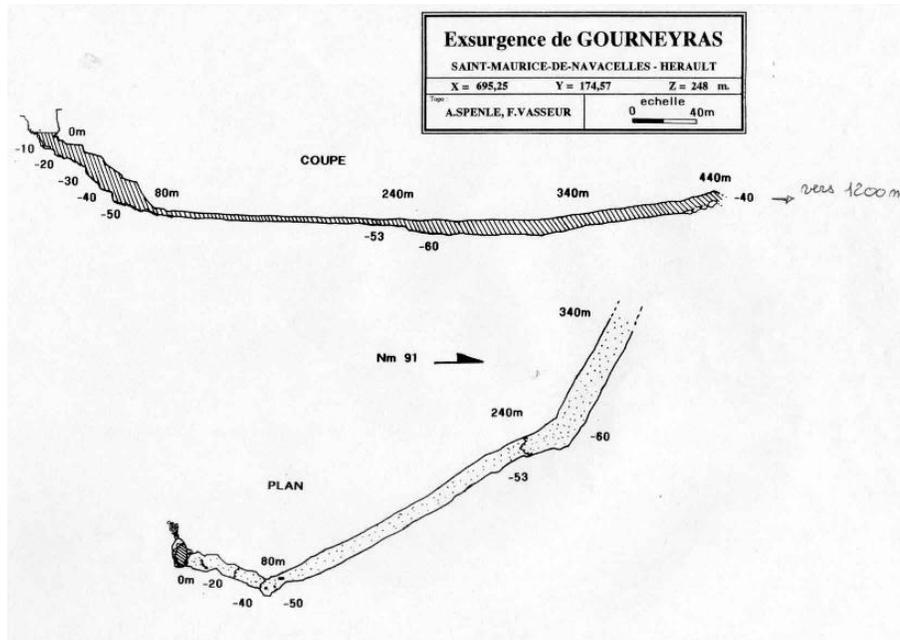


FIGURE 12 – Topologie "manuelle" effectuée par A. Spenle et F. Vasseur en 1991.

5.2 Expérimentation du 14 Juillet : Cartographie utilisant le Navscoot

Nous avons testé le Navscoot lors du second jour d'expérimentation où il fut piloté successivement par Rémi Bouchard et Frank Vasseur. Il fut décidé que la galerie d'entrée (les 80 premiers mètres de l'aquifère) qui avait été partiellement scannée par le robot la veille serait utilisée par les plongeurs pour prendre en main le système ainsi que pour le photographe. Pour la cartographie, les plongeurs se concentreraient alors sur la cartographie d'une grande galerie horizontale située après les 80 premiers mètres.

Le retour des plongeurs sur le système s'est révélé positif. L'ajout du corps porteur de capteurs ne nuit pas à la maniabilité du scooter. Les plongeurs n'ont constaté, comme nous pouvions nous y attendre, qu'une légère augmentation de l'inertie nécessitant de prendre des virages plus ouverts. Toutefois, dans le contexte d'un système de cartographie, il ne s'agit pas là d'une limitation puisque des virages moins serrés facilitent le processus de construction et réduisent aussi les erreurs du DVL ce qui permet de reconstruire une meilleure trajectoire.

Les plongeurs ont également été intéressés par l'interface de navigation du scooter. Toutefois, ils n'ont pas pu la tester de manière extensive. En effet, après environ 24 minutes de plongée, un défaut dans le câble connectant le sonar profilométrique à la carte d'acquisition a entraîné une voie d'eau dans le câble causant une perte de connexion avec le capteur. Le programme de stockage des données a alors détecté l'erreur et s'est mis en sécurité. Nous n'avons dès lors pas pu acquérir de données après ce point. Néanmoins, les informations acquises ont permis de cartographier l'aquifère sur une distance de près de 300 mètres.

Comme pour le robot, nous avons pu reconstituer le profil de plongée (Figure 14) et la trajectoire (Figure 13) réalisés par le Navscoot. Il faut noter que la trajectoire ayant été plus rectiligne que celle du robot, nous avons pu filtrer plus facilement le bruit dans les données.

Nous avons également pu reconstruire le modèle 3D de l'environnement. Puisque dans ce cas, le sonar profilométrique n'était utilisé que pour la cartographie, nous avons utilisé une résolution angulaire de 3.6° . En outre, vu les dimensions supérieures de certaines portions de la galerie centrale par rapport à la galerie d'entrée, nous avons adopté une portée de 20 mètres pour le capteur.

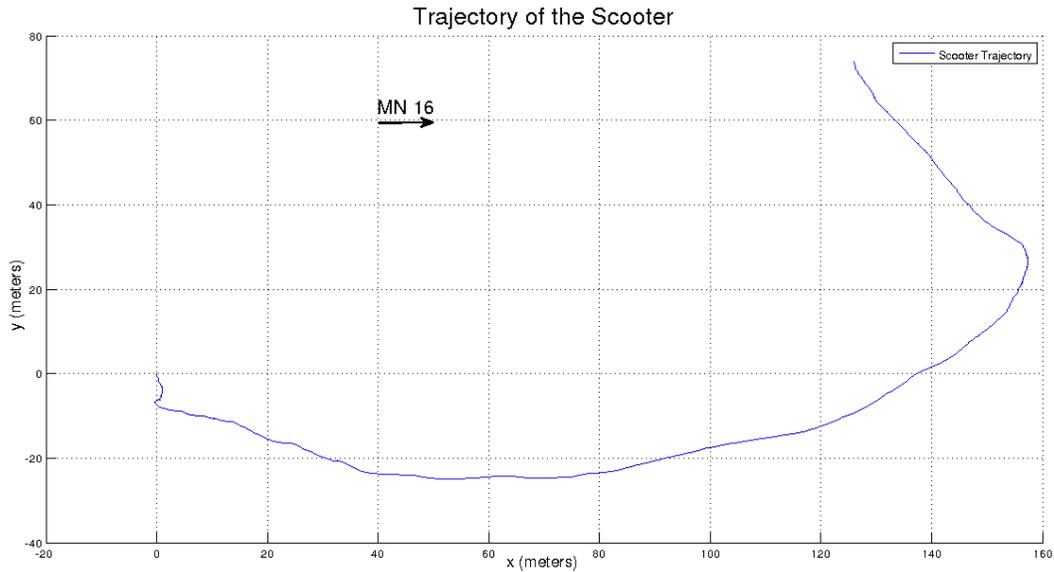


FIGURE 13 – Trajectoire suivie par le Navscoot.

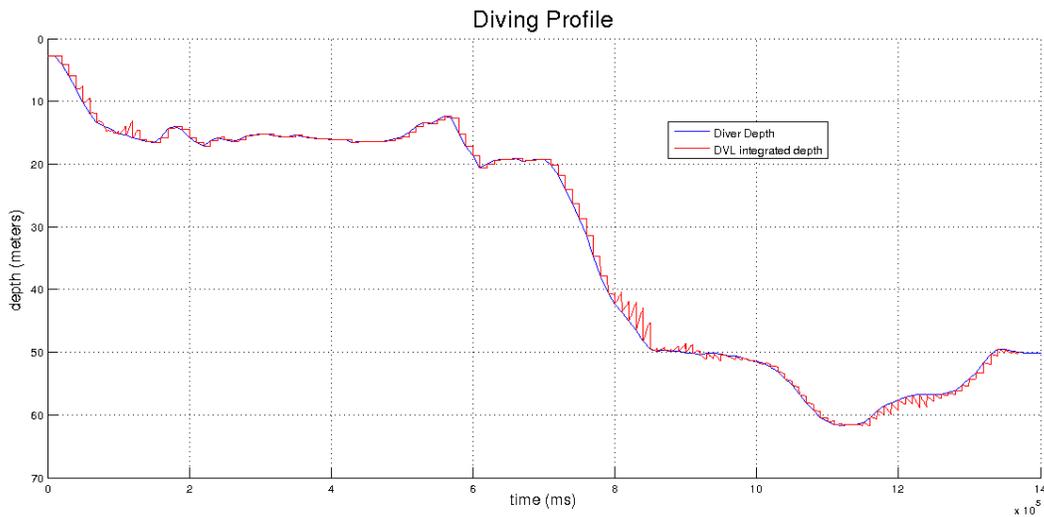


FIGURE 14 – Profil de plongée du Navscoot (courbe bleue) et du plongeur (courbe rouge).

Nous avons pu également utiliser le modèle 3D acquis pour proposer une topologie de cette galerie (Figures 16 et 17). Elle demeure consistante avec celle établie par les plongeurs (Figure 12). Toutefois des différences apparaissent notamment dans les distances parcourues. Ainsi au niveau du virage (bien identifié sur les deux topologies) nous obtenons une erreur de distance parcourue de 50 mètres. Ces erreurs peuvent néanmoins s'expliquer à la fois par

l'imprécision tant des plongeurs (qui estiment que leurs erreurs, notamment en termes de cap, peuvent atteindre 20%) que de notre système (et notamment la dérive qui apparaît naturellement en intégrant les vitesses du DVL). Enfin, une différence de positionnement du point servant de référence au calcul des distances parcourues explique également les écarts constatés.

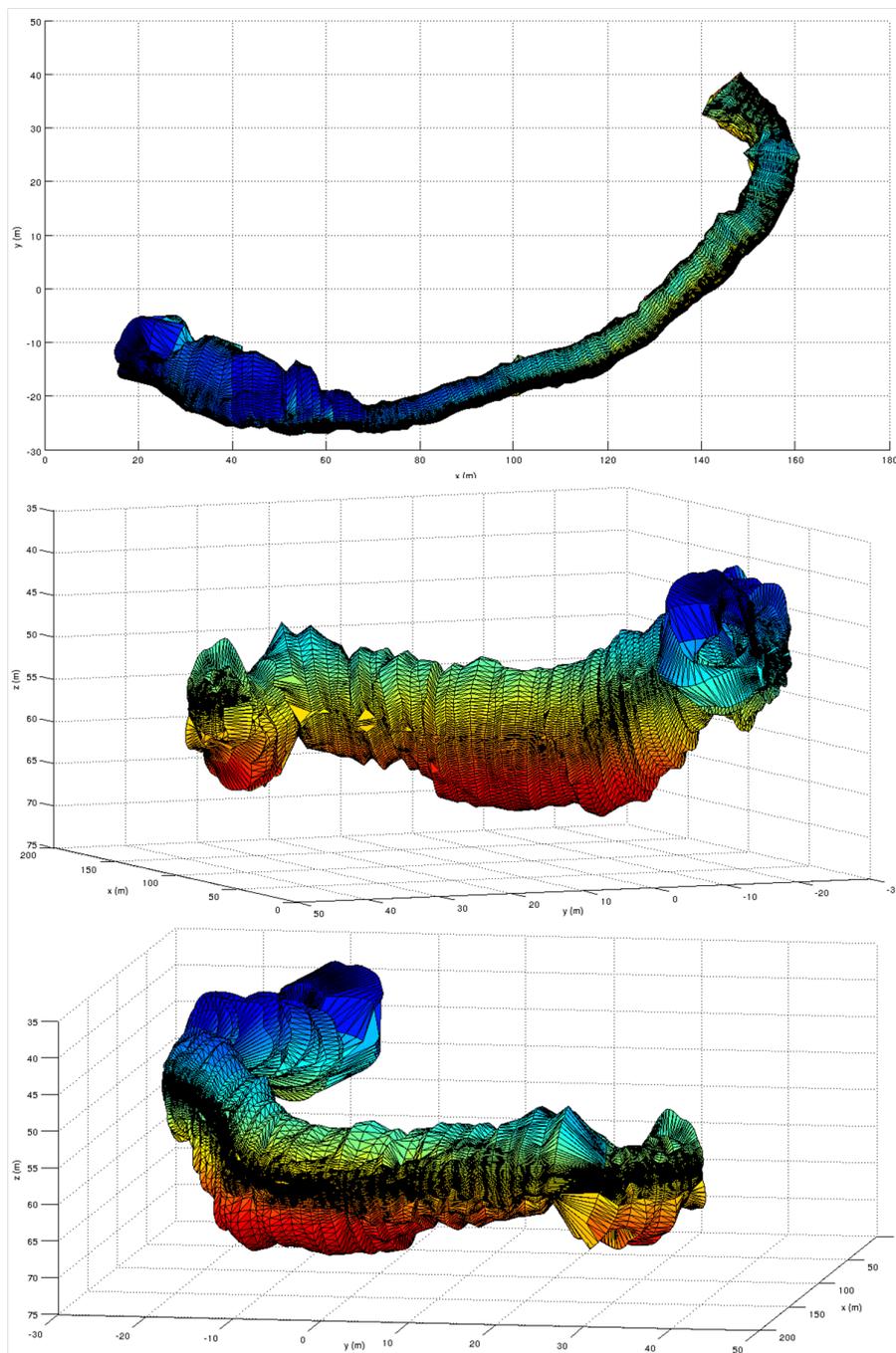


FIGURE 15 – Modèle 3D de la galerie réalisé par le Navscoot vu sous différents angles.

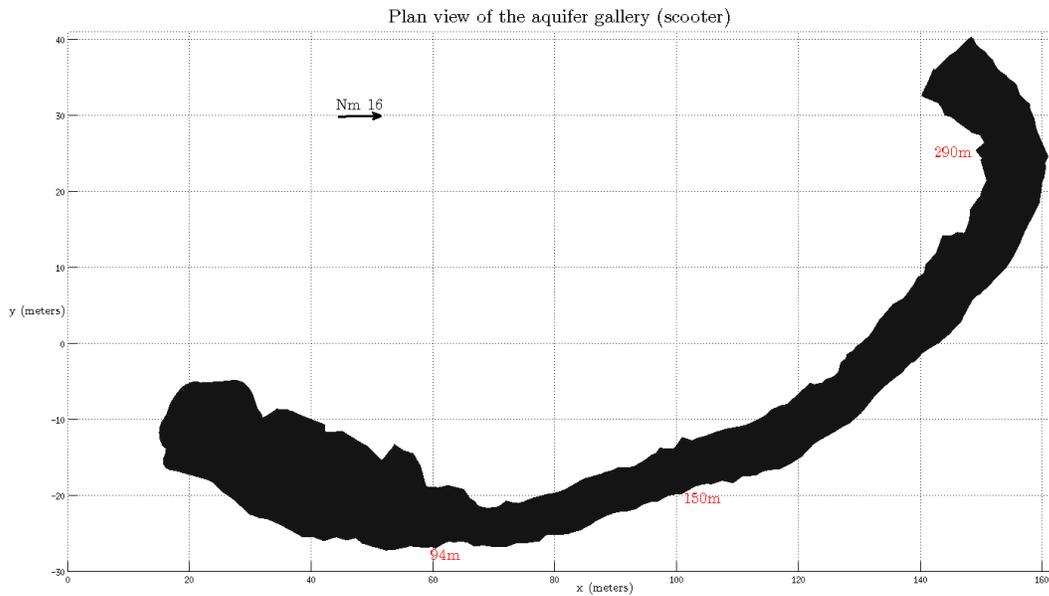


FIGURE 16 – Vue en plan de la galerie cartographiée par le Navscoot.

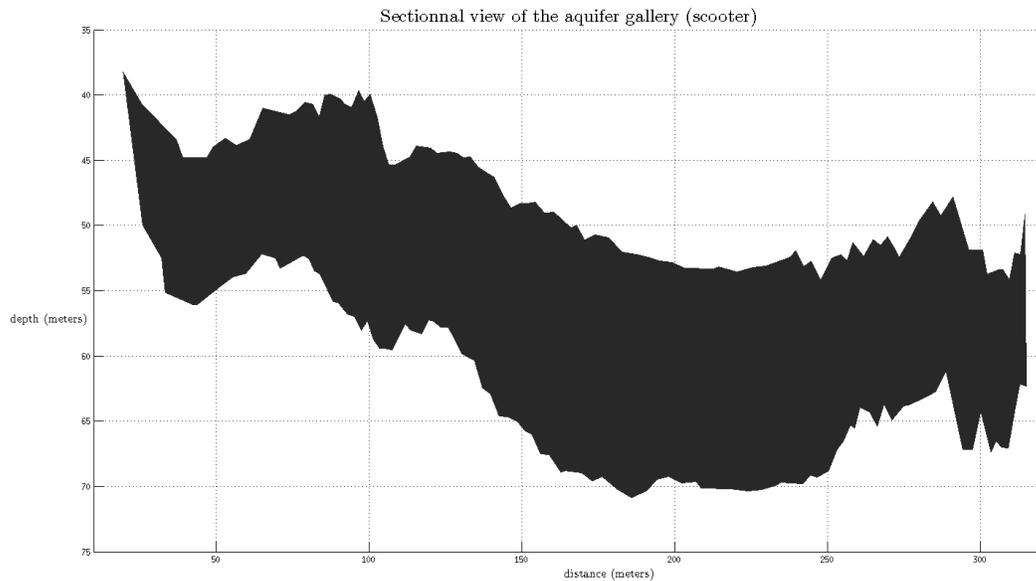


FIGURE 17 – Vue en coupe de la galerie cartographiée par le Navscoot.

6 Difficultés rencontrées

Bien sur, notre technologie est encore en cours de développement et cette mission nous a permis de mettre en évidence ses limitations.

Le câble ombilical s'est, comme escompté, révélé problématique. Il s'est ainsi accroché aux rochers à plusieurs reprises en raclant le fond chaotique de la galerie comme le montre la

Figure 18. Les plongeurs ont ainsi du intervenir à trois reprises afin de dégager le robot qui n'aurait donc pas pu revenir sans leur présence. Il faut également noter que ces blocages ont eu lieu lors de la phase retour quand un boucle est apparue dans le câble suite aux différents virages pris par le robot. Il est donc indispensable de donner au robot une autonomie suffisante afin de pouvoir se décrocher d'un ombilical coincé et pour atteindre de manière autonome un point de récupération.



FIGURE 18 – Une boucle dans le câble ombilical s'accroche à un rocher (Crédits Photos : Mehdi Dighouth).

La navigation dans un environnement aussi chaotique s'avère difficile même pour un pilote de ROV expérimenté. Et plus particulièrement, le côté chaotique des parois rend difficile une localisation spatiale précise du robot. Ainsi il nécessaire de renforcer l'automatisation d'un certains nombre de fonctions de pilotage afin de simplifier la tâche de l'opérateur. En outre, il peut être intéressant de développer le retour d'informations effectué sur le poste de l'opérateur ce qui, couplé à l'assistance d'un expert du milieu, devrait permettre un navigation plus aisé lors de la phase d'exploration. Toutefois, le besoin d'informations de ce type illustre qu'il est difficilement envisageable de mettre en œuvre une navigation totalement autonome lors de la phase d'exploration. Dans ce cadre, le besoin de communication avec l'opérateur et un expert en surface soulignent qu'il n'est pas envisageable de ce passer de l'ombilical lors de la phase d'exploration confirmant la décomposition de la mission en deux phases et la nécessité de pouvoir se libérer du câble lors de la phase retour.

Enfin, les données acquises ont souligné les faibles performances du Loch Doppler dans ce type d'environnement. Nous allons continuer à travailler les réglages de ce capteur afin d'améliorer la qualité des données acquises. Toutefois, nous devons aussi travailler sur des solutions alternatives à ce capteur et qui seraient plus adaptées aux contraintes des milieux

confinés. Similairement, nous devons travailler à des solutions pouvant remplacer le sonar profilométrique qui, s'il a donné satisfaction par rapport à la qualité des données acquises, est pénalisant au vu de sa lenteur d'acquisition de données.

7 Conclusion

Ce rapport de mission traite de l'expérimentation réalisée dans l'exsurgence de Gourneyras les 13 et 14 juillet 2016. Au cours de cette expérimentation, nous avons mis en œuvre deux systèmes de cartographie sous-marine, l'un robotisé et l'autre piloté par un plongeur.

Malgré certaines difficultés liées principalement aux limitations technologiques de nos systèmes actuels dans notre contexte applicatif, nous avons pu acquérir de nombreuses données et atteindre les trois principaux objectifs de cette mission :

- Preuve de concept : Nous avons démontré à la fois la capacité de notre système à cartographier des aquifères karstiques en produisant des données plus précises que celles obtenues par des levées manuelles tout en prenant un temps bien moindre. Et si, à court terme, les limitations technologiques des solutions robotiques les empêchent de pouvoir effectuer des relevés sur de longues distances, le système Navscoot a convaincu les plongeurs à la fois par sa facilité de mise en œuvre et par la qualité des données remontées. Cela nous incite à poursuivre le développement de ce système notamment pour améliorer sa fiabilité.
- Identification des axes de développement : Nous avons mis en lumière les limitations technologiques des solutions développées actuellement. Le câble s'est révélé problématique et démontre que la capacité de se séparer du câble lors de la phase retour est indispensable pour pouvoir envisager des missions de cartographie longue distance. La navigation dans de tels environnements est également difficile et nécessite à la fois de soutenir l'opérateur du robot par l'automatisation de certaines fonctions de navigation mais explicite aussi le besoin du maintien d'un lien avec la surface lors de la phase d'exploration afin de bénéficier de la connaissance des experts du milieu pour naviguer le robot. Enfin, les limitations des capteurs acoustiques actuels dans un tel environnement soulignent le besoin de développer des solutions alternatives en termes de capteurs.
- Collecte de données : Nous avons pu réaliser deux cartographies, l'une sur une distance d'une trentaine de mètres et l'autre sur près de 300 mètres de galerie. Nous avons pu également mettre en place les outils de traitement des données acquises qui peuvent ensuite être exploités par des hydrogéologues pour acquérir une meilleure compréhension du milieu. Cette expérience et les données acquises nous seront précieuses pour le développement de la seconde génération de prototypes d'exploration karstique.

Ces expérimentations soulignent ainsi la pertinence des travaux menés dans le cadre du projet ALEYIN pour la proposition de solutions innovantes pour la collecte de données en environnement confinés.

8 Remerciements

Les équipes du LIRMM tiennent à remercier les membres de PlongéeSout : Hélène Delas, Pedro Balordi, Rémi Bouchard, Mehdi Dighouth, Manu Dugrenot, Eric Jacquemin et Frank Vasseur.

Les équipes du LIRMM tiennent à remercier le Labex NUMEV qui a financé ces recherches via la bourse ANR-10-LABX-20.