



Robotique d'exploration Karstique

Projet LEZ 2020

Rapport Final présentant les derniers résultats de terrain

Ce rapport présente les résultats de terrain issus du projet LEZ 2020. Les avancées relatives au développement de systèmes robotiques et électroniques ont été présentés dans le rapport relatif au lots 2, et 3, ainsi que dans les annexes. Ce rapport focalise sur l'objet principal du projet : la cartographie 3D des réseaux karstiques noyés, lieux de la ressource en eau. Si le principal objectif du projet est la réalisation de la cartographie des sources du LEZ, d'autres missions ont eu lieu, notamment à la Fontaine de Nîmes et la fontaine de Sauve. Il faut noter que les missions de cartographies se poursuivent.



Lionel Lapierre, le 8/07/2023

1. Problématique générale

Le système robotique envisagé pour réaliser la cartographie des réseaux karstiques suivant la stratégie évoquée dans les rapports précédents requiert un ensemble de capteurs dont la validation est une étape préliminaire nécessaire. Le projet LEZ 2020 aura permis d'identifier les capteurs adaptés au contexte de l'exploration karstique robotisée. Il aura aussi permis de réaliser le système NavScoot 2 qui réalise de telles cartographies. Ce système ne devait être qu'une réalisation intermédiaire devant mener à la conception d'un robot complet semi-autonome. L'adaptation aux contraintes de la crise sanitaire nous ont fait ajuster nos objectifs qui se sont recentrés sur la conception, la réalisation et le déploiement du NavScoot2. Ce système, au-delà d'être une *milestone* importante du projet, il s'est avéré d'un intérêt applicatif reconnu. Il est devenu un objet unique de cartographie karstique dont l'amélioration et le l'utilisation nécessitent la réalisation d'un agenda propre.

Les capteurs des systèmes robotiques subaquatiques sont généralement répartis en deux familles en fonction de leur finalité.

a. Les capteurs de Navigation

Ces capteurs permettent de réaliser la fonctionnalité de *navigation* du robot, c'est-à-dire la reconstruction de la trajectoire géo-référencée que le système aura suivie. Ces capteurs sont reproduits à la figure 1.



Figure 1 : les capteurs de Navigation

i. *Inertial Measurement Unit (IMU), ou centrale inertielle*

Il s'agit d'un capteur classique comprenant 9 axes de mesures : 3 axes de mesures d'accélération (accéléromètre), 3 axes de mesures du champ magnétique terrestre (magnétomètre) et trois axes de mesures des vitesses angulaires (gyromètres). La fusion itérative de ces mesures permettent d'obtenir une bonne estimation de l'attitude du système, i.e. son orientation par rapport au repère absolu, sous la forme des 3 angles d'Euler ou du quaternion associé. Nous employons la centrale inertielle Ellipse-E de chez SBG (Figure 1-a). Il faut cependant noter la sensibilité de ce capteur aux perturbations électromagnétiques, surtout son magnétomètre. Nous verrons plus loin que l'usage de ce capteur dans le NavScoot le rendra sensible aux perturbations issues du moteur du scooter de plongeur sur lequel il sera

monté. Nous proposerons plus loin deux solutions pour corriger les effets de ces perturbations.

ii. Doppler Velocity Log (DVL)

il s'agit d'un capteur sonar à effet Doppler qui permet d'obtenir une estimation de la vitesse absolue du système suivant les 3 axes attachés au véhicule. Ce capteur fonctionnant sur une technologie sonar, son fonctionnement sera altéré par le contexte confiné de l'exploration karstique (multi-chemin). Ainsi le premier essai de capteur avec le *ROWE Seapilot* (Figure 1-b) s'est avéré décevant. La fréquence d'utilisation de ce capteur est en effet trop basse pour que le signal soit atténué suffisamment pour ne pas engendrer de phénomène de multi-chemin inextricables. Nous avons ainsi testé un autre capteur DVL, le DVL 1000 de chez Nortek (figure 1-c) qui a donné de bien meilleurs résultats et qui est maintenant intégré dans la suite de capteurs de navigation montés sur le système.

Ainsi les mesures issues de ces deux capteurs permettent d'obtenir une estimation périodique de l'orientation du système ainsi que les composantes de son vecteur vitesse, exprimé dans le repère du véhicule. L'utilisation des données d'attitude permettent de calculer la vitesse du véhicule dans le repère absolu. L'intégration temporelle de ces estimations permettent ensuite de reconstruire la trajectoire que le système a réalisée. Notons cependant que l'intégration des données bruitées issues des capteurs induit une dérive de l'erreur dans l'estimation de la trajectoire. Cette erreur peut être corrigée avec 3 approches différentes. Une première consiste à réduire cette dérive par l'emploi d'algorithmes de redressement de trajectoire de type SLAM. Cette solution requiert de traiter les données de cartographie (acquise par le sonar profilométrique présenté dans la suite) en ligne pour corriger l'estimation de la position suivant le recouvrement des modèles géomorphologiques de l'environnement acquis successivement. Cette solution a fait l'objet de l'étude menée par Y. Breux dont il est question précédemment. Elle n'a pas encore été testée sur le terrain. La deuxième solution est d'effectuer un recalage global du système par repérage depuis la surface de l'artéfact magnétique qu'un barreau magnétique monté sur le système génèrerait. Cette solution est encore à l'état de concept puisque l'emploi d'un barreau magnétique perturberait d'autant plus les informations de la centrale inertielle. On imagine cependant pouvoir contrôler ce barreau magnétique et le solliciter sur commande, ce qui impacte l'organisation même de la mission d'exploration. Cette solution est en perspective. La troisième solution est d'employer un autre type de capteur, en remplacement de la centrale inertielle sensible aux perturbations électromagnétiques : la centrale de navigation.

iii. Centrale de Navigation

Cette technologie est différente de celle des centrales inertielles en ce sens qu'elle ne repose pas sur l'emploi d'un magnétomètre, mais sur l'emploi de Gyro-Compas lasers qui, par l'exploitation de l'effet physique Sagnac, permet d'obtenir une estimation très précise des vitesses de rotation suivant les 3 axes du système. Ainsi le remplacement de la centrale inertielle par la centrale de Navigation RovINS Nano de chez IxBlue (Figure 1-d) permettra une bien meilleure estimation de la trajectoire suivie par le système. Ce capteur n'a pas encore été intégré au système. Il le sera prochainement.

b. Les capteurs de mission

Ces capteurs sont destinés à l'échantillonnage de l'environnement et qui mènera à la réalisation de modèles locaux et globaux faisant l'objet du livrable de la mission. La distinction qui est généralement faite entre capteurs de navigation et capteurs de mission n'est plus vraiment valable pour le cadre de l'exploration karstique telle que nous la traitons dans le présent projet. En effet, contrairement à ce qui est généralement le cas en robotique sous-marine, les capteurs de mission participent à l'amélioration de la navigation (SLAM Acoustique) et au contrôle réactif du système. En effet la stratégie suivie conduit à utiliser les sonars d'échantillonnage pour dresser des modèles locaux de l'environnement de manière à ce que le système puisse en permanence se situer dans cet environnement et réalise un centrage autonome le conduisant le plus loin possible des parois du conduit karstique et ainsi éviter les collisions avec l'environnement. Cette particularité conduit donc à employer les données acquises par les capteurs de mission dans la boucle de contrôle du système, imposant ainsi des contraintes temporelles quant à la disponibilité et la précision des modèles issues de leurs mesures.



Figure 2 : les capteurs de mission

i. Sonar Profilométrique sagittal

Il s'agit d'un sonar qui, par la mesure du temps de vol du signal acoustique émis et renvoyé par l'environnement, permet d'obtenir une estimation de la distance entre le système et l'environnement, dans la direction d'émission de l'onde acoustique. Ce sonar est monté sur une tête mécanique rotative et permet l'acquisition de 300 points de mesure pour une rotation complète. Ce capteur est monté dans l'axe du véhicule et l'échantillonnage est donc effectué dans un plan perpendiculaire à la direction principale du véhicule. Le véhicule progressant (la plupart du temps) suivant l'axe principal du conduit, le sonar permet d'échantillonner suivant le 'plan de coupe du conduit'. Plus précisément, le véhicule progressant à une certaine vitesse dans le conduit, l'échantillonnage de l'environnement suit un profil hélicoïdal, comme indiqué sur les résultats expérimentaux exposés dans la suite. Le sonar sélectionné est le Super Seaking de chez Tritech (Figure 2-a). Il faut noter que ce type de sonar permet une portée d'insonification jusqu'à 70m de fauchée. Cependant, cette distance de fauchée est paramétrable. Plus elle est sélectionnée faible, plus la vitesse de rotation du sonar sera rapide et l'échantillonnage dense. Plus elle est grande, plus l'échantillonnage sera faire ainsi que la vitesse de rotation de la tête acoustique. Ce paramètre est, pour l'instant, réglé en début de mission. Ainsi les cartographies que nous avons

effectuées sont parfois partielles puisque la variabilité de certains environnement visités aurait requis une fauchée réglable. Cette question fait actuellement l'objet d'une amélioration sur laquelle nous travaillons.

ii. Sonar Profilométrique horizontal

Ce sonar est basé sur le même principe que celui précédemment décrit. Il vient compléter les informations de ce dernier pour avoir un échantillonnage horizontal. Cependant les informations qu'il fournit ne sont pas (encore) exploitées pour effectuer le centrage réactif du système. Par contre elles entrent en jeu dans la méthode de SLAM acoustique que nous proposons. Ces méthodes reposant sur l'analyse du recouvrement entre 2 scans successifs, la largeur du pinceau acoustique est un paramètre important puisque la recherche de recouvrement implique que les scans successifs balayent des régions similaires de l'environnement. Ainsi l'ouverture du cône acoustique est plus importante que pour le sonar précédent. La question de la vitesse de rotation de la tête acoustique est ici moins contraignante, puisque ces informations ne sont pas exploitées dans la boucle de contrôle. Nous avons donc opté pour un sonar moins onéreux et beaucoup plus compact, le Micron de chez Trittech (figure 2-b).

iii. Echosondeur

Un échosondeur est un capteur sonar permettant d'estimer la distance à l'environnement dans une seule direction. Nous avons choisi de le monter vers l'avant. Il servira pour confirmer la présence d'objet se trouvant sur la trajectoire du système et devant induire une procédure d'évitement d'obstacle. L'avantage de ce capteur par rapport au sonar profilométrique horizontal est sa vitesse. En effet il permet d'obtenir 10 mesures par seconde, contrairement au Micron qui inspecte une direction identique de l'environnement après avoir effectué une rotation complète, c'est-à-dire, toute les 6 secondes approximativement. L'échosondeur sélectionné est le ISA 500 de chez ImpactSubsea (figure 2-c).

c. Les moteurs du robot

La question de l'actionnement est essentielle, comme l'ont indiqué les différentes études menées sur les actionnements redondants. Cependant, les différentes adaptations du projet aux aléas rencontrés durant les 3 années de sa réalisation ont conduit à nous concentrer sur le développement des systèmes NavScoot (1 et 2) et de délaier la réalisation du robot autonome opérationnel, le robot télémaque. D'autres systèmes robotiques ont été développés (robot cube, robot parapluie, robot anguille) mais ce sont des prototypes de laboratoires qui ne sont pas destinés à être déployés sur le terrain. Ils ont été utiles pour démontrer en piscine les concepts nouveaux que les différentes études menées ont fait émerger.

Ainsi le système opérationnel envisagé, le robot Télémaque (Figure 3), reprend les principes de redondances issus des études, mais n'a pas été finalisé pour être déployé en environnement karstique. Ceci fait l'objet des prochains développements.

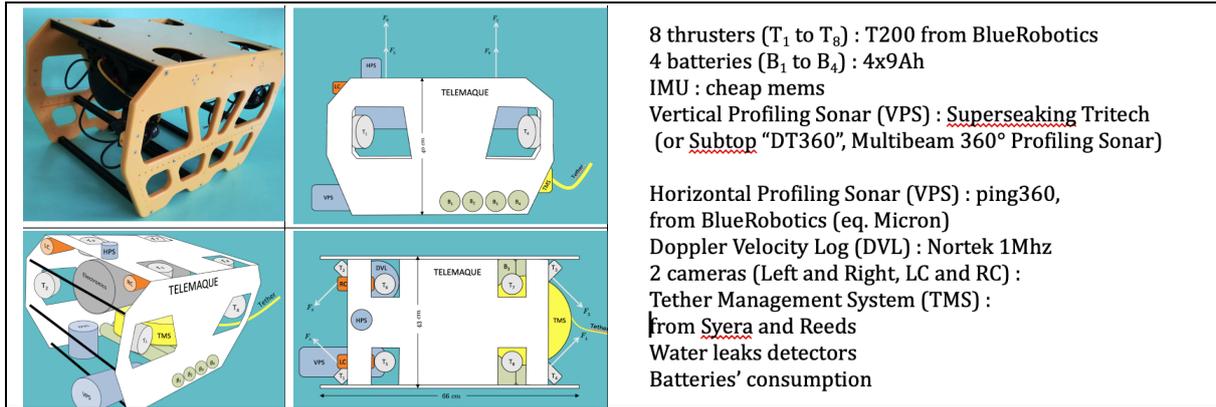


Figure 3 : le robot Télémaque

2. Les systèmes opérationnels développés

a. Les prédécesseurs : Ulysse et le NavScoot

Les premiers systèmes robotiques à avoir été développés dans le cadre de l'action de recherche REK (Robotique d'Exploration Karstique) ont été le robot Ulysse (Figure 4-a) et le système NavScoot (Figure 4-b, haut), ainsi que sa variante le HammerShark (Figure 4-b-bas).

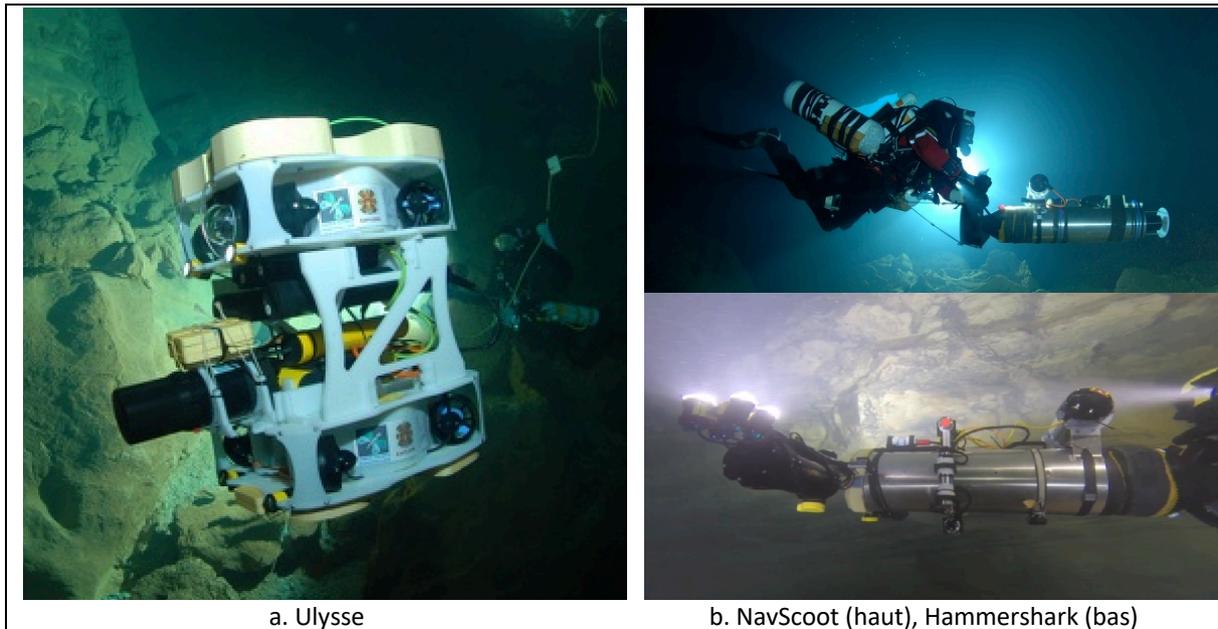


Figure 4 : les systèmes opérationnels précédents (photo par F. Vasseur)

i. Les premières cartographies :

Les systèmes Ulysse et NavScoot ont été immergés dans le gouffre de Gourneyras et ont permis la réalisation des cartographies reproduites à la figure 5.

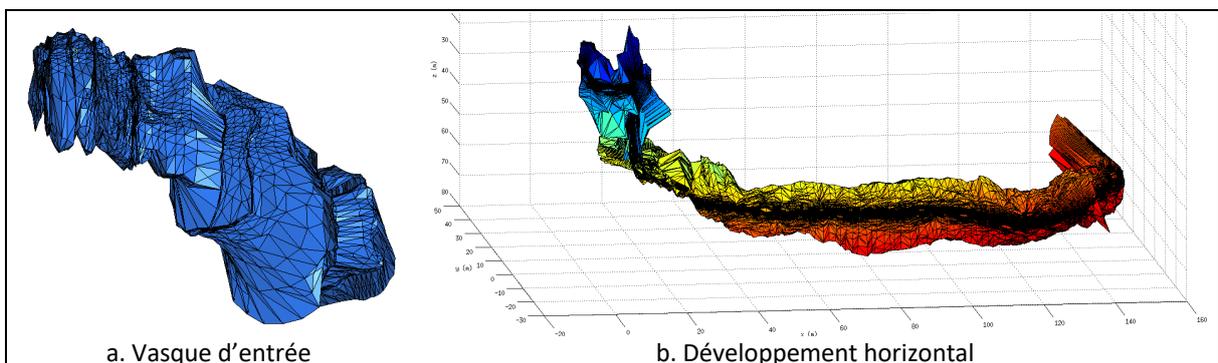


Figure 5 : cartographie du gouffre de Gourneyras

Figure XXX (Carto Vasque entrée + Carto développement horizontal)

La HammerShark, quant à lui, a permis de traiter de la question de l'utilisation de la photogrammétrie en contexte karstique noyé. La question de la turbidité qui peut advenir

inopinément rend caduque toute solution basée sur la vision à long terme. Cependant, la qualité des modèles reconstruits par photogrammétrie reste une option qui ne saurait être ignorée lorsque les conditions sont favorables. Le Durzon (Figure 6) est un site qui renferme une eau légèrement turbide et l'emploi de la solution photogrammétrique dans ce contexte est réaliste et nous permet d'évaluer les limites de cette approche. Nous en avons aussi profité pour utiliser une autre approche de la cartographie acoustique en utilisant 4 échosondeurs plutôt que le sonar profilométrique Tritech. Cette solution permet d'obtenir une fréquence d'acquisition bien supérieure à celle du sonar profilométrique, mais moins dense. De plus la morphologie de cette cavité présente la particularité de comporter 4 cheminées verticales dont la détection facilite la navigation de type SLAM. Les données ainsi acquises ont pu être exploitées dans les études relatives à la proposition de SLAM acoustique que nous avons faite.

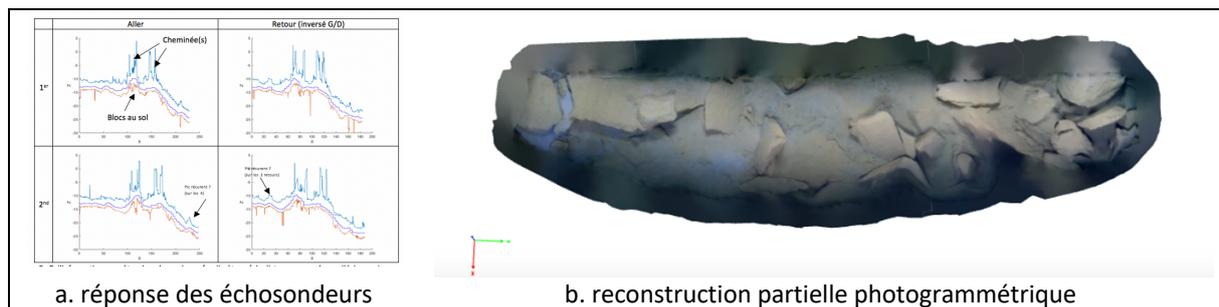


Figure 6 : exploration du Durzon

ii. Bilan de ces premières expérimentations :

Les premières expérimentations ont montré la limite de certains capteurs, notamment le DVL SeaPilot ROWE, remplacé dans la suite par le DVL 1000 Nortek. Ce choix a été validé lors d'une expérimentation spécifique menée dans la Source Saint Antoine à Toulon. Le nouveau DVL (Nortek) a été monté sur une platine avec la centrale inertielle SBG. Un plongeur a parcouru la source et la trajectoire a pu être reconstruite. Les résultats sont bien meilleurs, mais présente, comme il était attendu, une dérive visible (Figure 7).

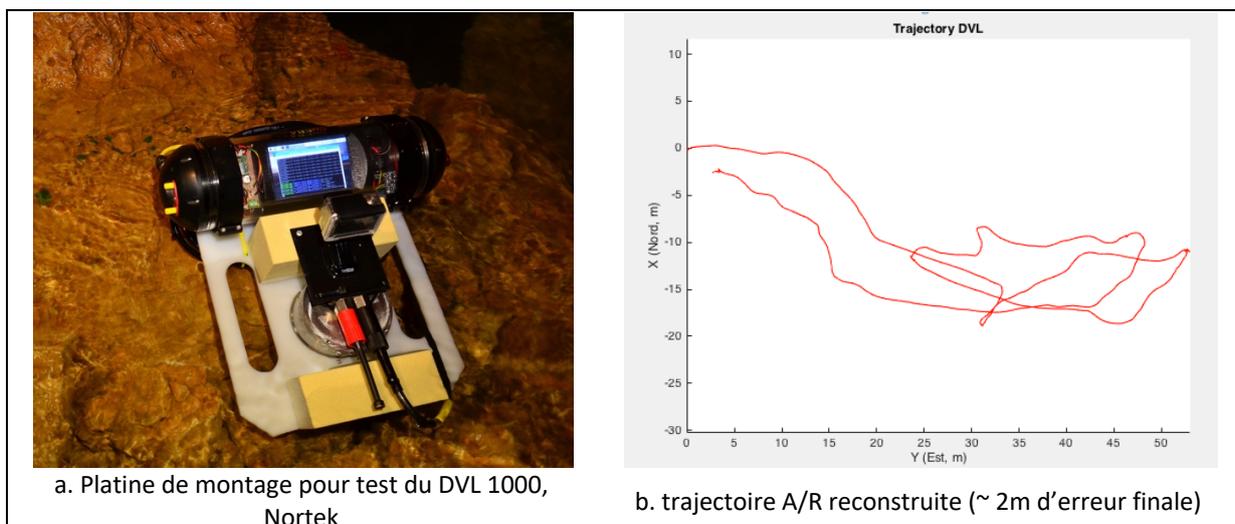


Figure 7 : test du DVL Nortek dans la source Saint Antoine (Toulon)

La solution photogrammétrique testée dans le Durzon a montré ses limites tant en termes de conditions environnementales requises que du point de vue de la lourdeur des nombreuses données (images) nécessaires comme facteur limitatif tant du point de vue du stockage embarqué de ces données que de la charge computationnelle requise par leur traitement. Cette solution, malgré la précision extrême du modèle reconstruit n'est pas retenue puisqu'elle i) est conditionnée par la clarté de l'eau, ii) limiterait la longueur de la mission et iii) la capacité computationnelle embarquée lorsque la construction des modèles se fera en ligne (solution robotique autonome).

b. Le système opérationnel : le NavScoot 2

Les précédentes expérimentations ont permis de tester les limites et intérêts des différentes solutions retenues et nous avons intégré les conclusions établies dans une nouvelle version du système plongeur : le NavScoot 2 (Figure 8). Le NavScoot 2 a été pensé comme un système compact et caréné de sorte à éviter les éléments saillants pouvant se prendre dans les reliefs de l'environnement et intégrant l'ensemble des capteurs précédemment validés. Il centralise l'information des capteurs sur le système *Dive Angel*, permettant une visualisation en ligne de l'état des capteurs et des mesures qu'ils effectuent. L'interface Homme-Machine doit encore être améliorée et les plongeurs ont établi une liste de spécification qu'ils attendent de cette interface. En effet, elle peut leur permettre d'avoir une 'vision acoustique' de l'environnement qui leur permettrait de se sortir de situations où la turbidité est importante.

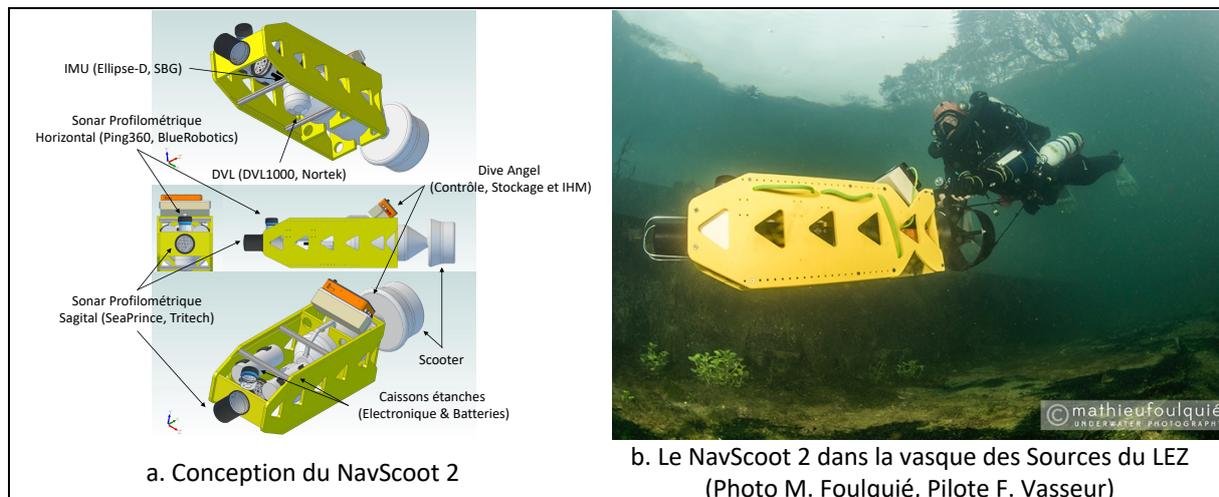


Figure 8 : le système plongeur NavScoot 2

c. Les missions de terrain

Les sites qui ont été sélectionnés pour procéder à nos premières expérimentations sont :

- La Fontaine de Nîmes
- Les Sources du Lez
- La Fontaine de Sauve
- Les Fontanilles

d. La fontaine de Nîmes

i. Description et historique (extraits du site de la mairie de Nîmes¹)



Figure 9 : La fontaine de Nîmes

Cette source est une résurgence des eaux de pluies qui s'infiltrèrent dans les sols karstiques des garrigues, au nord de la ville. C'est autour d'elle que s'installèrent les premiers habitants de Nîmes. Ils en firent un lieu sacré dédié au dieu Nemausus.

Plus tard les Romains l'intégrèrent dans l'Augusteum. Ils construisirent le bassin avec ses deux escaliers semi-circulaires en pierre, afin de lui donner un caractère plus monumental. A proximité se dressait certainement un petit temple. Dès la fin de l'empire romain, le site fut abandonné et finit par être enseveli.

Malgré ce, au XVIII^e s., l'eau de la source jouait toujours un rôle primordial. Elle alimentait les ateliers des teintureries, une des principales activités économiques de la ville, organisée autour de l'industrie du tissu. Nîmes était en pleine expansion et des travaux pour augmenter le débit et assainir l'eau de la Fontaine étaient devenus nécessaires. A cette occasion les ruines romaines furent remises à jour. Cette découverte connut un retentissement européen, notamment parmi les érudits du siècle des Lumières. Jacques Philippe Mareschal fut chargé par le roi de réaliser un programme d'aménagement ambitieux. Au-delà de l'amélioration de l'approvisionnement en eau, il s'agit alors de mettre en valeur les vestiges et de créer une « promenade jardin » en rapport avec la nouvelle importance de la ville. Les jardins de la Fontaine.

¹ <https://www.nimes.fr/decouvrir/histoire-et-patrimoine/la-source-et-laugusteum.html>

ii. Les explorations du réseau (extraits du site de Gilbert Jouanen et de Plongéesout²)

C'est en 1905, que Félix Mazauric, géologue et spéléologue nîmois, mettant à profit une année de forte sécheresse, entreprend pour la première fois l'exploration de la Fontaine de Nîmes. Pénétrant dans le réseau souterrain par l'aven qui jouxte l'issue naturelle de la source, il accède à une salle demi noyée. De cette dernière, il entrevoit ce qui semble être le sommet d'une grande galerie sans toutefois pouvoir y accéder.

En août 1955, une équipe de plongeurs du CAMA d'Alès effectue sans succès une première tentative de jonction entre la vasque et la galerie aperçue par Félix Mazauric. En 1956, nouvelle tentative et nouvel échec. Mais, en 1957, deux plongeurs, M. Poudevigne et Y. Girault, établissent la jonction et réussissent l'exploit de progresser de 80 mètres dans une large galerie.

Au début des années soixante, l'activité spéléologique est en plein essor et l'idée s'impose progressivement, dans plusieurs clubs de la cité gardoise, d'une exploration de la Fontaine de Nîmes. La décision est prise en 1965 et la technique retenue est celle du pompage. L'aventure, pour les membres de l'Association Spéléologique Nîmoise (fusion du Spéléo-Club Nîmois et de l'Equipe Nîmoise de Spéléologie), commençait et dure depuis avec la même passion.

L'expédition NEMAUSA II - La première expédition portera le nom de Nemausa II, Nemausa I regroupant tous les travaux effectués avant 1966. Elle débutera le 1er octobre 1966 et se terminera 12 jours plus tard.

Cette première expédition aura été celle de ...l'apprentissage et de la découverte. Pour la première fois depuis la fondation de la cité, le 5 octobre 1966, une équipe parvient, en canot, et à l'air libre, à pénétrer dans une vaste galerie, longue de 90 mètres, et qui portera désormais le nom de galerie Mazauric, en hommage aux travaux du géologue spéléologue. Elle sera parcourue à pieds secs quelques heures plus tard. Au-delà, la galerie plonge verticalement dans l'eau. C'est le siphon 1966 qui sera le terminus de cette première expédition. Ses enseignements seront essentiels pour la suite à venir.

NEMAUSA III - Forte des enseignements de Nemausa II, Nemausa III débute le 1er septembre 1967. Le jeudi 7, le siphon 1966, terminus de Nemausa II, est franchi. Devant les spéléologues se déroule alors une vaste galerie remontante à laquelle succède une salle horizontale. Puis la galerie plonge à nouveau verticalement dans l'eau. C'est le siphon 1967. Ce nouvel obstacle, après des efforts coûteux en énergie et en matériel, sera vaincu le jeudi 14. Un fantastique paysage souterrain s'ouvre alors devant les spéléologues : le Seuil, le passage de "Capou", puis la Cascade Nord et la Cascade Ouest, le passage du "Yéti", puis un vaste et inquiétant plan d'eau. C'est le siphon terminal, sondé à -20 mètres, dont la profondeur ne permettra pas d'envisager le pompage avec le matériel de l'époque.

NEMAUSA IV - Au cours de cette expédition effectuée exclusivement en plongée en juin et juillet 1969, deux plongeurs de l'Association Spéléologique Nîmoise, G. Bernieux et R. Lienhart

² <https://www.plongeesout.com/sites/roussilon-pyrenees/gard/fontaine%20de%20nimes.htm>

réussiront à progresser sur quelques centaines de mètres dans le réseau Nord, ce qui permettra d'envisager une nouvelle tentative de pompage en 1970.

NEMAUSA V - Programmée en septembre 1970, l'expédition Nemausa V permettra d'effectuer une reconnaissance importante, en plongée, du réseau Nord au-delà du terminus de 1969. Par contre, la tentative de désiphonnage du siphon Ouest, baptisé siphon 1970, malgré les moyens importants mis en place, sera un échec. Nemausa V apporte la preuve que seules les plongées sont à l'époque susceptibles d'obtenir des résultats. Aussi, pour plusieurs années, le relais est passé aux plongeurs. En reconnaissance des travaux effectués depuis 1966, l'Association Spéléologique Nîmoise recevra la médaille de la ville de Nîmes et, en 1972, la plus haute récompense spéléologique française : le prix Robert de Joly. Cette expédition a fait l'objet d'un reportage télévisé dans la célèbre émission Les Coulisses de l'Exploit, diffusée le 17-8-1971.

DE NEMAUSA VI A NEMAUSA XI - Ces six expéditions, effectuées exclusivement en plongée, vont faire évoluer considérablement la connaissance du réseau. La branche nord est explorée et topographiée sur plusieurs centaines de mètres, dans des conditions particulièrement difficiles (puits de 40 m, étroitures, boue, etc...). En 1984, au cours de l'expédition Nemausa X, le plongeur P. Penez franchi, pour la première fois et en solo, le siphon 1970 et son empilement de blocs (la Trémie). Au-delà, il explore quelques centaines de mètres de réseau.

NEMAUSA XII - Au cours de l'année 1990, la faisabilité d'une nouvelle exploration par pompage et plongée est mise à l'étude. La décision est prise fin 1990 et l'expédition Nemausa XII est programmée du 15 août au 15 septembre 1991. Elle débutera le 13 août de cette même année. Quelques nouveautés importantes sont mise en oeuvre au cours de cette expédition. Tout d'abord le transport des pompes, par les plongeurs, dans les galeries inondées pour les mettre en attente dans les zones stratégiques. Ensuite la puissance du matériel de pompage par rapport aux précédentes expéditions, et le synchronisme avec les travaux de plongée. Enfin, l'infrastructure de surface où les spéléologues pouvaient se restaurer et se reposer sur place. Il ne faudra que quelques jours pour assécher le réseau jusqu'au siphon 1970 (1000 m3 en début de pompage).

Le dimanche 25 août, le plongeur Guy Peigney, parti avec une équipe, trouve et franchit un passage au milieu de l'empilement de blocs du siphon 1970. A son grand émerveillement, il débouche à l'air libre dans une grande salle. Au-delà, une galerie aux dimensions imposantes se développe. Plusieurs journées seront nécessaires pour continuer l'exploration et effectuer les relevés topographiques et scientifiques.

Au cours d'une des plongées, Serge Gilly, incrédule, tombe nez à nez avec des poteries à même le sol d'une galerie en voie d'exploration. En synchronisme avec les plongées, le siphon 1970 est équipé en matériel de pompage. Le 28 août les essais sont satisfaisants et l'eau se met doucement à baisser. Malheureusement, dans la nuit du 31 août au 1er septembre, des précipitations importantes, nous obligeant à déséquiper le réseau, mettent fin au pompage de 1991. La totalité du réseau souterrain de la Fontaine de Nîmes est porté alors à environ 2900 mètres.

NEMAUSA XIII - Nemausa XIII regroupe tous les travaux entrepris sur le réseau souterrain de la Fontaine de Nîmes et sur son bassin d'alimentation durant les années 1992 à 1997. Des

explorations en plongée sont organisées et débouchent sur de nombreux résultats. Parmi ces derniers c'est, d'abord, le relevé topographique des galeries découvertes, puis la récolte de deux des poteries vues par Serge Gilly au cours de l'expédition Nemausa XII. La première est d'époque gallo-romaine, datée du 1er siècle avant notre ère, et la seconde d'époque médiévale (Pégau), datée entre le XIIIe et le XVe siècle.

Cette découverte très importante, au point de vue spéléologique, et l'écart de datation existant entre les deux poteries, confirme qu'au moins un puits naturel était ouvert durant plusieurs siècles sur le réseau souterrain où, pense-t-on, les habitants allaient puiser de l'eau. Aussi, après la mise à jour de la topographie, les spéléologues sont persuadés que ce puits se trouvait au lieu-dit Creux de Moulery" (Clos des Pins), exutoire maintenant colmaté de la Fontaine en période de crue et qui a pu être créé accidentellement par l'exploitation d'une carrière par les Romains.

A partir de ces nouvelles données, un puits artificiel situé à quelques mètres de cet ancien exutoire, et connu depuis quelques temps, devient pour les spéléologues de l'Association Fontaine de Nîmes (créée en 1994) une priorité. Hélas, ce puits sert de dépotoir depuis de nombreuses années, d'où son nom peu glorieux : le puits Poubelle. Quelques travaux de nettoyage avaient bien été entrepris par l'Association Spéléologique Nîmoise en 1990, mais les conditions sont telles que les travaux cesseront au bout de trois mètres. En 1994, les travaux de déblaiement reprennent et en septembre enfin le puits est vidé complètement. A sa base, l'eau arrive par une série de micro-trous le long d'une ligne de fracture. Après deux années de travaux de désobstruction pour agrandir la base du puits, les spéléologues accèdent à une petite galerie étroite et, le 9 février 1997, deux plongeurs, Claude Gilly et Richard Huttler, réussissent, après une trentaine de mètres de progression, à recouper la galerie principale du réseau Ouest de la Fontaine. Et cela, quasiment à son terminus de l'époque. Enfin, après tant d'années de recherche, un deuxième accès au réseau souterrain vient d'être mis à jour.

Fort de ce résultat, la perspective d'une expédition par pompage, depuis le puits Poubelle, est envisagée pour 1998, et c'est la solution du pompage par forage, jouxtant le puits, qui est retenue. Les forages sont effectués en juillet 1998.

NEMAUSA XIV - L'expédition commence le 8 août 1998 et le pompage le lundi 10 août. Le réseau est accessible le 15 août et délivre toute sa beauté : cascades, galerie des Chailles, réseau aval... La galerie des Chailles, vient apporter la solution pour la suite du réseau amont. En effet, le terminus, avant l'expédition Nemausa XIV, était un passage quasiment infranchissable (laminoir) pour les plongeurs. La galerie des Chailles permet de court-circuiter cette difficulté et ouvre l'accès sur une galerie de belles dimensions.

Du 15 au 23 août, les équipes se succèdent : explorations, relevés topographiques, plongées, prélèvements de sédiments, prélèvements d'eau, reportages photographiques et vidéo, récolte d'ossements. Sept ans de travaux, un an de préparation, huit jours de collecte d'informations. Cette expédition est sans doute la plus riche depuis 1966. 1000 mètres de nouvelles galeries ont été découverts. Le réseau souterrain de la Fontaine de Nîmes, avec quasiment 4500 mètres de développement, prend une des premières places parmi les 20 plus grandes cavités du Gard et en bonne place des réseaux noyés de France.

iii. Exploration avec le NavScoot 2.

Quatre opérations de plongées ont été organisées dans la vasque de la fontaine de Nîmes dans le cadre du projet LEZ 2020. Les deux premières ont été infructueuses du fait d'une panne de la version originelle du NavScoot. Les deux suivantes ont été organisées avec la nouvelle version le NavScoot 2. Les résultats obtenus sont reproduits à la Figure 10.

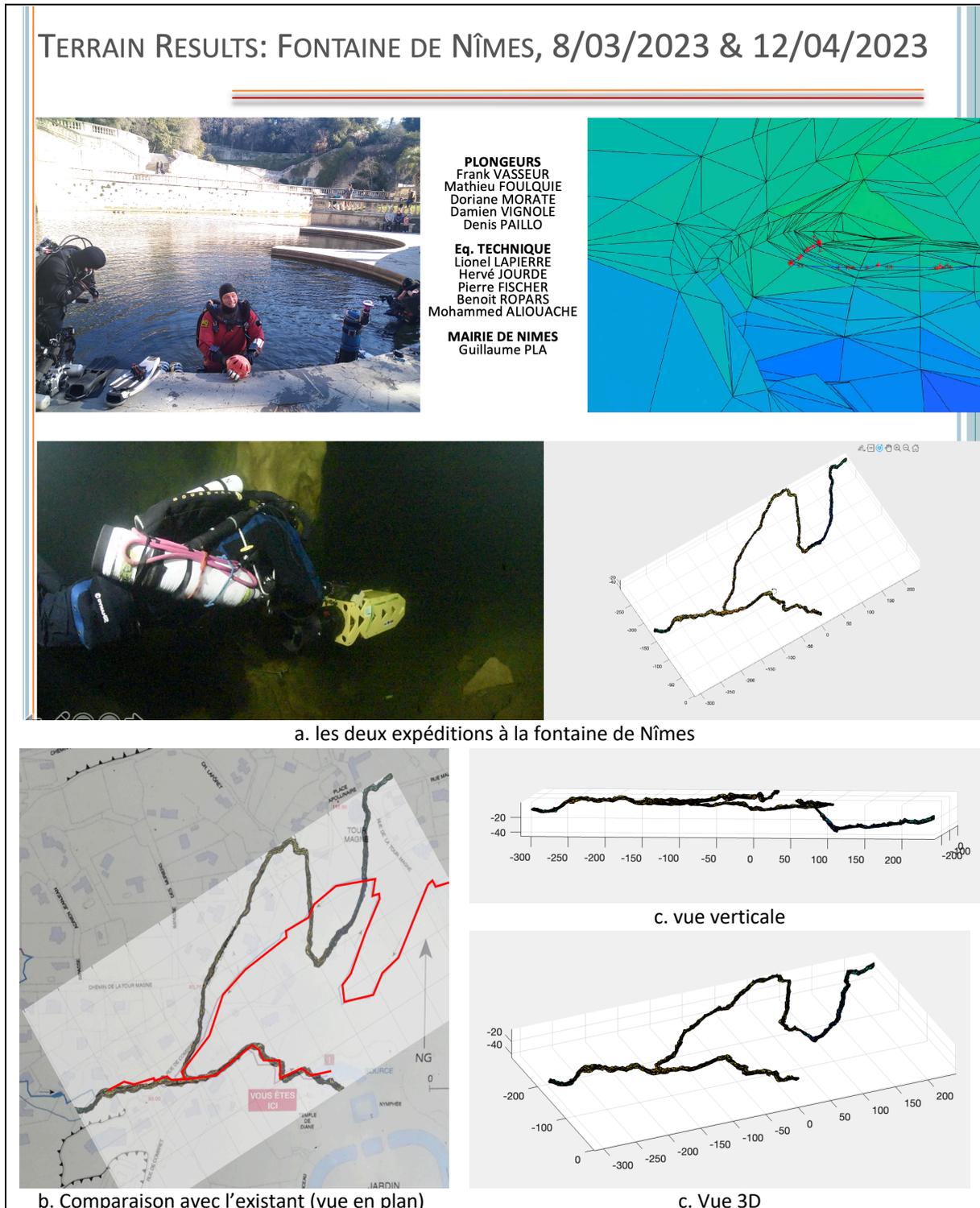


Figure 10 : Cartographie de la Fontaine de Nîmes (photos F. Vasseur et M. Foulquié)

iv. Analyses des résultats

La vue en plan indique une cartographie structurellement compatible avec les connaissances préalables de la source. Cependant, la dérive de l'estimation du cap perturbé par le champ magnétique du moteur puissant du scooter de plongeur est nettement visible. L'adjonction du nouveau capteur de Centrale de Navigation (RovIns, IxBlue) devrait permettre de nettement réduire cette dérive. De nouvelles opérations de plongée seront à prévoir lorsque ce nouveau capteur sera intégré à une version 3 du NavScoot.

v. Remerciements

Toute l'équipe du projet tient à chaleureusement remercier les plongeurs qui nous ont accompagné sur ces missions, ainsi que Mr. Guillaume Pla, responsable du service Espada de la Mairie de Nîmes qui nous a tellement facilité l'organisation de ces missions.

e. Les Sources du Lez

i. Description et historique (extraits du site de la Métropole Montpellier Méditerranée³)



Figure 10 : Les sources du LEZ

La source du Lez assure l'alimentation en eau potable de 74% de la population des 31 communes de la Métropole.

Elle se situe au Nord de Montpellier, dans une zone de roches calcaires vieilles de plusieurs dizaines de millions d'années, propices à l'infiltration et au stockage de l'eau de pluie, grâce aux nombreuses fissures qui les traversent.

Elle est exploitée depuis le 18^{ème} siècle, grâce notamment au fameux aqueduc de 19km construit par l'ingénieur Pitot, reliant la source au réservoir du Peyrou.

La qualité de l'eau de la source du Lez fait l'objet de contrôles réguliers et d'un suivi approfondi. Assez fortement minéralisée, elle ne présente pas de contamination chronique aux pesticides et présente une bonne qualité chimique et bactériologique, sauf très ponctuellement, en cas de fortes crues. Toutefois, comme souvent dans ce type de zone géologique (dit aquifère karstique), la vulnérabilité de la source du Lez est élevée et Montpellier Méditerranée Métropole est particulièrement vigilante à sa préservation.

L'eau de la source du Lez est captée au moyen de trois groupes de pompage constitués de deux pompes immergées en série, fonctionnant à vitesse variable et débitant de 600 à 1 000 l/s.

Les niveaux d'eau mesurés à la source du Lez fluctuent au gré des saisons et surtout au gré des périodes de pompage intense - durant l'été - et des périodes de recharge - pluie, principalement durant l'automne. Une gestion active est alors pratiquée. Elle consiste, quand les besoins de la population sont importants (été), à pomper des débits supérieurs au débit

³ <https://www.montpellier3m.fr/tout-savoir-sur-la-source-du-lez>

naturel du conduit souterrain. Les réserves sont ainsi fortement sollicitées mais se reconstituent naturellement lors des pluies d'automne. Le reste du temps, le débit pompé est inférieur au débit naturel. Cette gestion active est ainsi durable et préserve cette ressource en eau essentielle à la vie de notre territoire.

Différentes études ont été menées, et sont régulièrement mises à jour, par Montpellier Méditerranée Métropole pour accroître la connaissance du fonctionnement de la source du Lez, améliorer sa gestion et évaluer son potentiel dans les années à venir. Par exemple, le projet Lez – GMU (Gestion Multi-Usage) mené avec l'Agence de l'eau, le BRGM, le Département de l'Hérault et le laboratoire public HSM (Hydro-Sciences Montpellier), a permis notamment la réalisation de différentes simulations en fonction de différents scénarios intégrant le changement climatique et l'évolution démographique du territoire, afin de s'assurer du potentiel de la ressource en eau et de sa préservation à long terme.

ii. Les explorations du réseau

Les explorations historiques dans les sources du lez n'ont été que peu documentées. De plus après l'installation de la station de pompage Avias (date), les plongées ont été rares et les autorisations difficiles à obtenir, le site étant en exploitation pour l'alimentation de la métropole de Montpellier. On peut cependant citer les deux archives du Midi Libre, rassemblées par F. Vasseur dans son ouvrage *Rétrospective historique des plongées souterraines d'exploration dans le département et secteurs limitrophes*⁴ et dont les articles sont reproduits à la figure 11.

⁴ F. Vasseur, *Rétrospective historique des plongées souterraines d'exploration dans le département et secteurs limitrophes*, Les dossiers de CELADON, n°3, Aout 1993, Fédération Française de Spéléologie.

HIER, POUR LA PREMIERE FOIS

La source du Lez a été explorée par un sportif montpelliérain

Hier matin, et pour la première fois, la source du Lez a été explorée par un sportif montpelliérain. Et, quand nous parlons d'exploration, nous n'exagérons rien, puisque M. Leroy de Boisauumaric, président du Groupement de Recherches et d'Etudes sous-marines, a bel et bien plongé à une vingtaine de mètres de profondeur pour étudier en détail le fond de la cuvette de la source et observer le phénomène de résurgence qui donne naissance à cette source vacuisienne.

La performance sportive se mé-
le d'ailleurs, dans cette plongée, à
un but beaucoup plus pratique :
c'est, en effet, à la demande du
service des Eaux de la mairie de
Montpellier, que M. Leroy a prom-
pement découvert la source du
Lez.

Nous avons demandé à M. Leroy
des détails sur son expédition sous-
marine. Et tout d'abord sur son
équipement.

Ce n'est pas muni d'un scaphan-
dre, aussi inesthétique qu'encom-
brant que ce sportif a effectué sa
plongée, mais dans une tenue qui
rappelle celle des adeptes de la
chasse sous-marine.

L'appareil utilisé se compose res-
sentiellement de deux bouteilles
d'air comprimé à 200 kg., fixées sur
le dos d'un détendeur d'air qui
amène par deux tubes de caout-
chouc l'air de pression normale
jusqu'à la bouche.

Les yeux et le nez sont évidem-
ment protégés par d'énormes lunet-
tes étanches.

L'ensemble, dont la réalisation est
due au commandant Cousteau,
possède d'énormes avantages et
donne une autonomie totale au
nageur qui peut facilement rester
une heure sous l'eau avec deux
bouteilles d'air.

Dans ses observations sur la
configuration de la source, M. Le-
roy a noté, à 18 mètres de profon-
deur environ, une ouverture de
forme triangulaire, de deux mè-
tres de côté, par où surgit l'eau,
de provenance inconnue. Plus bas,
ce ne sont que blocs chaotiques et
cavernes présumées, mais encore
inexplorées. M. Leroy nous a con-
fié son intention de redescendre
très prochainement au fond de la
cuvette et tenter d'explorer les ca-
vernés et les masses rocheuses qu'il
n'a fait qu'entrevoir.

Espérons que notre audacieux
compatriote percera bientôt le se-
cret des grottes du Lez qui peu-
vent permettre d'intéressantes dé-
couvertes, sur les plans archéologi-
que et géologique.

MALGRE DE NOUVEAU X ET AUDACIEUX EFFORTS

LA SOURCE DU LEZ garde encore son secret

Hier, au petit matin, une animation assez inhabituelle régnait non
loin de Prades-le-Lez, en ce coin agreste où naît le Lez.
La source du Lez, issue de verdure nichée au creux de la roccaille
tourmentée, semble un coin de Provence égaré dans nos vignes lan-
guedociennes, avec ses garrigues parsemées d'arbousiers et ses bouquetans
de pins et de chênes-verts.

Sur les bords du bassin, tous
ceux qui passionnent les choses de
la géologie, de la spéléologie ou de
la recherche sous-marine, s'étaient
donnés rendez-vous pour être les
témoins d'une performance sporti-
ve allant à une extrême déli-
catesse.

De quoi s'agissait-il au juste ?
« Rien moins que d'une plongée au
fond de la cuvette du bassin, pon-
cée ayant pour but de déterminer
avec exactitude le point de jalli-
sissement de l'eau. »

La semaine dernière — on se le
rappelle —, nous avons relaté la
plongée qu'effectua M. Leroy de
Boisauumaric, président du groupe-
ment de Recherches et d'Etudes
sous-marines.

Cette opération — la première en
ce genre — avait été faite sur la sol-
licitation du service des eaux de
Montpellier, desirux de mieux cer-
neter l'origine de l'eau utilisée en
notre ville.

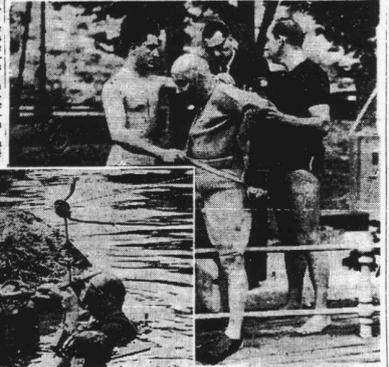
En effet, on ignore tout de la
provenance du Lez, fleuve côtier né

mes, disparut, lesté de plomb, vers
le fond de la cuvette, tapissée d'une
flore aux dessins étranges.

Et ce ne fut bientôt plus, à la
surface du Lez, bouché de man-
nars, que l'éclatement d'énormes
bulles d'air, marquant de loin en
loin, la lente progression de l'ex-
plorateur.

MM. Jammé, Schilliro et Balenti
disparurent bientôt, eux aussi, dans
l'eau trouble.

De temps à autre, l'un d'eux re-
montait à la surface, les traits tirés
par l'effort, et faisait part de
ses observations aux techniciens du
service des Eaux.



À droite : M. Leroy, aidé de MM. Schilliro et Jammé, revêt son
« épiderme » de caoutchouc, sous l'œil intéressé de M. Paul Boulet,
député-maire de Montpellier.

À gauche : après une longue plongée, M. Leroy prend appui sur une
embarcation pour se resserrer quelques instants.

né à le protéger de la fraîcheur de
l'eau, une sorte de carapace lui en-
ferme la tête et le corps et le té-
lécadre, tout en laissant pleine liberté
aux mouvements.

Après qu'on lui eût fixé sur le
dos les bouteilles d'air comprimé
et qu'il eût embouché l'orifice du
détendeur d'air (appareil dont nous
détails de leur tentative, on notait, avons récemment donné les de-
tails, M. Leroy, chaussé de pal-

Après des plongées successives à
15, 20 et même 25 mètres, les mem-
bres du groupement de Recherches
sous-marines réussirent — par sui-
te de l'abondance de courant — à
s'introduire dans la faille de résur-
gence où ils s'aventurèrent, munis
d'une ampoule électrique.

Des constatations effectuées, il
ressort que le secret de la source
n'a pas été violé et que l'on ignore
encore d'où provient l'eau consom-
mée dans notre ville.

Mais il apparaît que le bassin
du Lez ne jouerait que le rôle d'un
trop-plein, en relation par la faille
dont nous parlons plus haut, avec
une rivière souterraine, orientée
Nord-Sud, dont la partie septen-
trionale serait en pente très douce,
alors que vers la mer, au contrai-
re, la galerie accuse une déclivité
très accentuée et dangereuse.

C'est, très brièvement, ce qu'on
pu découvrir hier matin, par un
temps lourd et dans une eau qui
paraissait hostile, quatre athlètes
qui joignent au goût d'un sport pé-
rilleux le plaisir d'une recherche
utile au plus haut point.

Midi-Libre Vendredi 30 Septembre 1949 P.3

Figure 11 : articles parus dans le midi-libre les 23 et 30 septembre 1949

D'autres plongées ont eu lieu par la suite, principalement dans le cadre des études et de la réalisation de la station de pompage Avias, qui alimente maintenant la métropole de Montpellier. On trouve trace de ces plongées dans un article⁵ de Jacques Avias : *La source du Lez est l'exutoire d'une vaste conduite naturelle noyée connue des spéléologues plongeurs depuis 1949. C'est à eux qu'il sera fait appel pour repérer des zones d'élargissement de la cavité, susceptibles d'être recoupées par forage à partir de la surface. De 1965 à 1979, six équipes de spéléonautes se relaient pour tracer le plan de la cavité noyée jusqu'à 536 m en amont de la source et 75 m de profondeur. Une première zone favorable est repérée à 70 m de l'entrée et à 26 m de profondeur, puis une seconde à 225 m de l'entrée et à 42 m de profondeur.*

Les plongées relatives à la construction de la station Avias sont des documents privés, encore inaccessibles.

⁵ P. Gombert et J. Avias, 'Reconnaissance hydrogéologique et captage de la source du Lez pour l'alimentation en eau potable de la ville de Montpellier', Journées de l'hydraulique, Année 1998, 25-2 pp. 721-726

Les témoignages les plus récents de plongées dans la résurgence du Lez sont issus du film⁶ 'Source du LEZ - De la Source à la Mer, à la découverte des galeries immergées.' réalisé par la Métropole de Montpellier et durant lequel les plongeurs P. Abijou, M. Dighout et H. Benedittini ont accédé au réseau karstique depuis la station de pompage. C'est à notre connaissance les dernières plongées à avoir été entreprises dans les sources du Lez, jusqu'au projet LEZ 2020.

iii. Exploration avec le NavScoot 2.

Nous avons réalisé 14 plongées dans la résurgence des sources du LEZ dans le cadre du projet LEZ 2020. Les premières plongées ont montré que le site et son équipement avait souffert des différentes crues qu'il a connu et la connaissance ancienne du site ne permettait pas de mettre en œuvre le NavScoot 2 sans avoir au préalable nettoyé et sécuriser le site. Les nombreuses plongées de nettoyage et d'installation d'une nouvelle ligne de vie ont été menées malgré les perturbations liées à la crise sanitaire et les aléas météorologiques. Les résultats que nous avons obtenus sont reproduits à la figure 12.

iv. Analyse des résultats.

L'estimation de la dérive dans la reconstruction de la trajectoire est difficile à estimer. Encore une fois, le nouveau capteur (Centrale de Navigation RovIns, IxBlue), insensible aux perturbations électromagnétiques sera très utile pour lever les ambiguïtés entre la précision des mesures issues des topographies précédentes réalisées par les plongeurs et celles levées par le NavScoot 2. Il est intéressant de noter que les plongées effectuées ont permis de rencontrer les vestiges des travaux effectués lors de l'installation de la station Avias. En effet une boucle magnétique utilisée pour repérer la chambre de pompage depuis la surface, afin de guider le forage est toujours sur site. Les différents fils et cablottes utilisés alors ont du être sortis pour sécuriser les opérations de plongée et garantir qu'aucun fil en suspension viendrait se prendre dans le moteur du scooter, ou celui du robot, lorsque celui-ci sera mis en œuvre. Quant à la présence d'un grand vide karstique en amont de la station de pompage, nous confirmons sa présence, puisque certaines mesures acoustiques montrent des distances supérieures à 35m dans cette cavité. Nous devons effectuer les 2, 3 ou 4 dernières plongées afin de confirmer et cartographier cette zone, mais les faibles niveaux piézométriques rencontrés en fin de printemps de cette année 2023 ont rendu les plongées trop risquées. Ainsi ces plongées de finalisation sont reportées à l'automne 2023 lorsque les niveaux de la source le permettront.

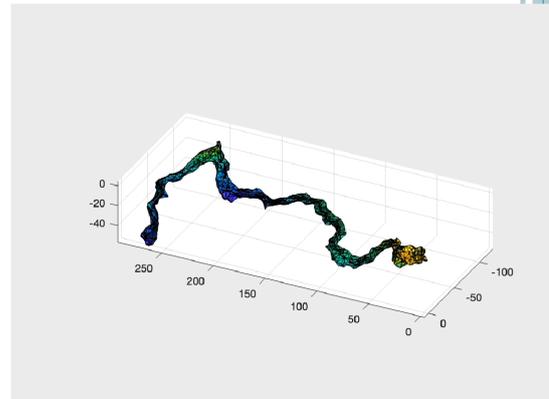
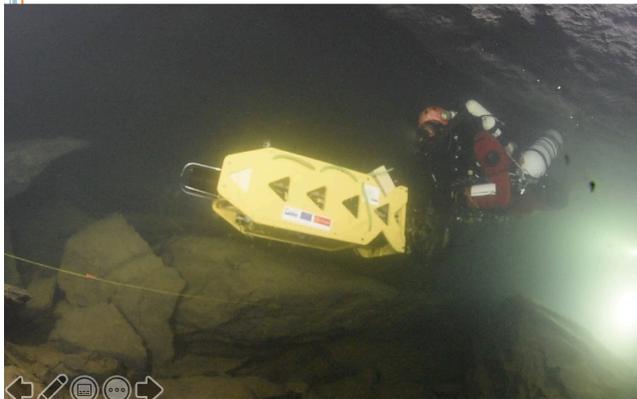
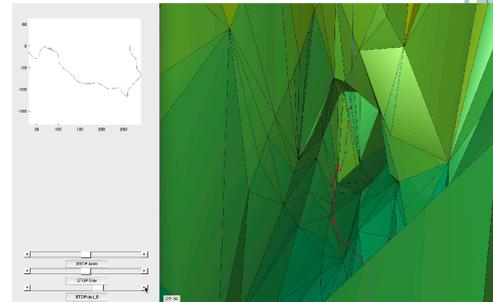
⁶ <https://www.youtube.com/watch?v=nU7tI2OhLL0>

TERRAIN RESULTS: SOURCE DU LEZ, 15/03/2023

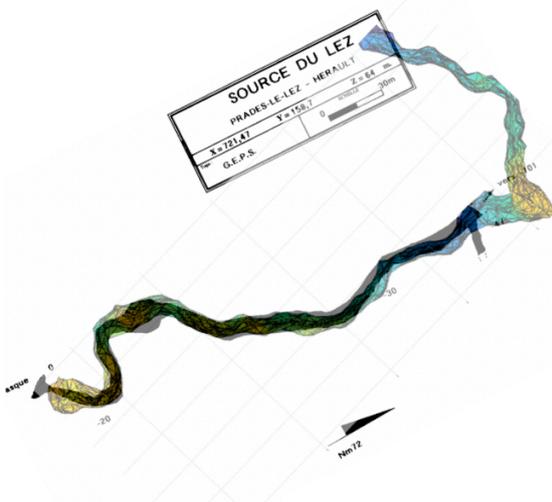


PLONGEURS
Frank VASSEUR
Mathieu FOULQUIE
Doriane MORATA
Dominique VIGNOLE
Denis PAILLO

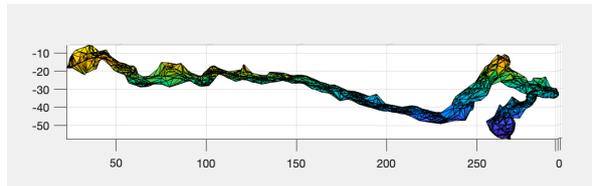
Eq. TECHNIQUE
Lionel LAPIERRE
Hervé JOURDE
Benoît ROPARS
Mohammed ALIOUACHE



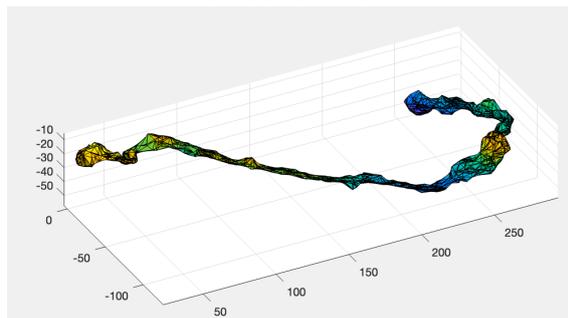
a. Exploration des sources du LEZ avec le NavScoot 2



b. Comparaison avec l'existant (vue en plan)



c. Vue verticale



d. Vue 3D

Figure 12 : Cartographie des sources du Lez (photos F. Vasseur et M. Foulquié)

v. Remerciements

Toute l'équipe tient à chaleureusement remercier les membres de la régie de Montpellier et de la Métropole de Montpellier pour nous avoir facilité les accès à cette merveilleuse source, tout particulièrement Mr. Jean-Philippe Gilbert qui s'est montré d'une disponibilité remarquable.

3. La suite et les perspectives

Le Navscoot 2 a aussi cartographié d'autres sites (Fontaine de Sauve, Fontanilles, Figure 13) et les sites présents dans la carte de la Figure 14 sont envisagés. Il s'agit d'un réel programme expérimental sur plusieurs années. Le système NavScoot 2, initialement conçu comme un système intermédiaire dont l'utilité était de valider la suite de capteurs qui seront montés sur le robot s'est avéré d'une utilité opérationnelle qui nous force à en changer la destination. Il est clair qu'une version 3 du NavScoot, fiabilisée, et intégrant la centrale de navigation trouvera son intérêt auprès de nos collègues hydrogéologues et aux gestionnaires exploitants de la ressource en eau.

La cadre dans lequel se système sera développé et déployé est encore l'objet de réflexions. Cependant, l'objet particulier qu'est la ressource en eau, depuis sa nature de *commun* jusqu'à la récente réalisation de sa raréfaction, nous pousse à envisager les actions de valorisation autour de nos travaux de recherche avec une perspective nouvelle. Plutôt que de contribuer à la création de *start-up* ou *Sppin-off* qui privatiserait une donnée qui doit rester publique, nous pensons qu'une structure de type fondation (FRUP – Fondation Reconnue d'Utilité Publique) qui associera des acteurs privés, institutionnels (nationaux et territoriaux), scientifiques, associatifs et citoyens, constituerait le creuset adapté à l'exploitation de nos travaux et tâcher de contribuer à la gestion de la crise hydrique déjà présente.

A cours termes, l'ANR ElectroKarst dont l'objectif est le développement d'un système poly-articulé intégrant une approche différente de l'interaction physique avec l'environnement karstique avec le *sens électrique*, permettra de continuer les développements de recherche autour de l'exploration karstique.