



Robotique d'Exploration Karstique

Un projet de recherche porté par l'Université de
Montpellier

Demande d'accès au site de la Fontaine de Nîmes afin d'y réaliser des tests expérimentaux de systèmes robotiques subaquatiques de cartographie semi-autonome en milieu karstique.

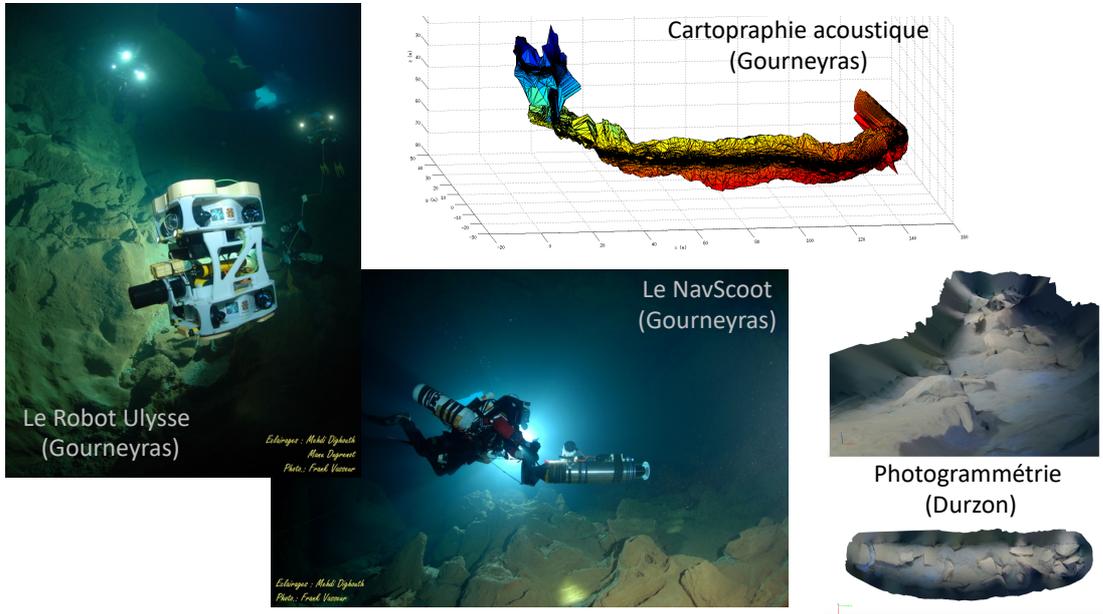


Projet cofinancé par le Fonds Social Européen

Contact : Lionel Lapierre (lapierre@lirmm.fr), Frank Vasseur (celadons@free.fr)

Objectifs généraux

- Objectif : cartographier et instrumenter le karst

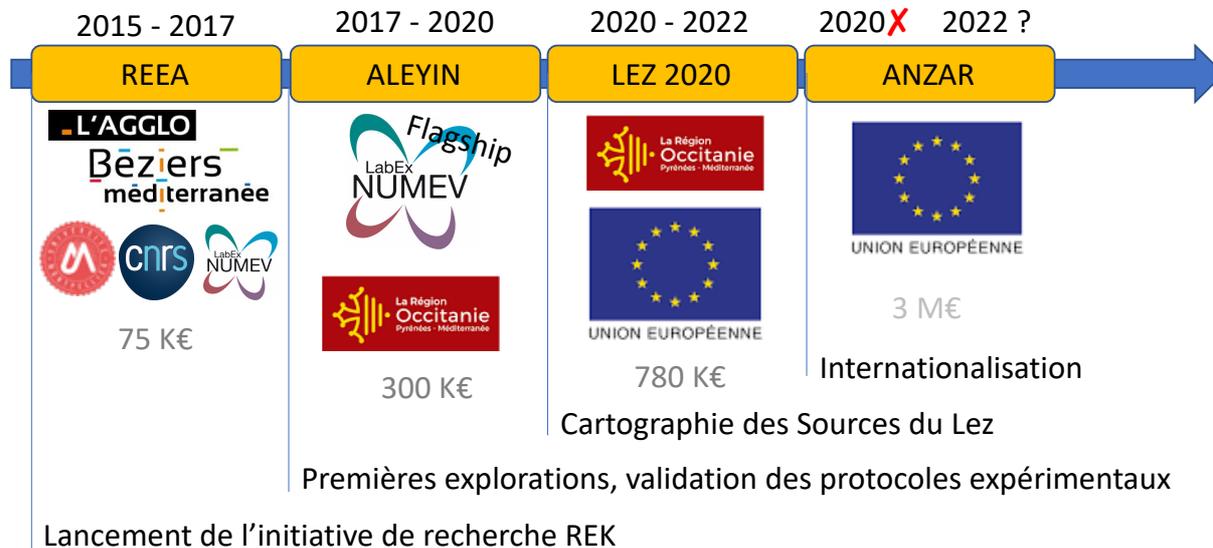


Le développement d'un outil Robotique Subaquatique d'Exploration Karstique qui puisse, de manière semi-autonome, visiter et échantillonner des aquifères souterrains en vue de la caractérisation de leur dynamique présente des défis scientifiques en Robotique, Électronique, Capteurs, Informatique et Mathématique de haut niveau. De plus, la compréhension de la dynamique des réseaux karstiques est un enjeu sociétal majeur et nos collègues hydrogéologues y consacrent d'intenses efforts. L'utilisation de systèmes robotiques permettra une mesure dense, fiable et reproductible, ainsi que de lever les restrictions dues aux limites physiologiques des plongeurs.

Outre l'impact de la solution robotique sur les questions de **l'évaluation, de la protection et de la prospection de la ressource en eau**, elle contribuera aussi à production de connaissance sur la caractérisation de la dynamique des transferts de charges dans les réseaux karstique, enjeu majeur pour la **prévision et la prévention des phénomènes de crues soudaines** que la région Occitanie subit lors des épisodes cévenols. Sont à noter les travaux que nos collègues de HSM mènent sur la possibilité de faire jouer au karst un rôle stockage ou de barrage écrêteur de crues, par une distribution et un pilotage judicieux des zones de pompage. Ceci nécessite une caractérisation fine des sites concernés et des explorations qui dépassent la capacité des moyens actuels (mesures indirectes ou plongeurs).

Outre l'intérêt sociétal évident du projet, une récente étude de marché sur la question de la vente de services innovants sur la question de l'inspection/exploration d'environnements subaquatiques confinés confirme l'intérêt économique du développement de tels engins.

Les étapes clefs du projet



Les actions de recherche autour de la Robotique d'Exploration Karstique se déclinent au travers de différents projets de recherche, certains passés, d'autres en cours, avec une perspective internationale identifiée et portée par le consortium du projet européen ANZAR¹.

Le projet ALEYIN, projet étendard du Labex NUMEV de l'Université de Montpellier (2017-2020), a permis d'initier les travaux de recherche sur le thème de la Robotique d'Exploration Karstique et a posé les bases techniques et scientifiques de la stratégie suivie actuellement

Le projet LEZ 2020, projet lauréat d'un financement FEDER Recherche & Société de la Région Occitanie (2020-2022), a pour objectif la mise en œuvre des résultats précédemment acquis pour effectuer une cartographie des zones inconnues du réseau karstique qui alimente Montpellier (Sources du LEZ).

Le projet ANZAR, projet Européen en cours de dépôt, rassemblant un consortium de 13 partenaires internationaux. Il s'agit d'internationaliser cette action de recherche en recourant à l'expertise reconnue de laboratoires de recherches européens et ainsi accroître les ambitions techniques et scientifiques.

Des vidéos des expérimentations réalisées sont à retrouver ici¹.

¹https://www.youtube.com/playlist?list=PLB1LwT_YiJ5a6Wyzl5yesxtam9iW7mrs

Une équipe transdisciplinaire

ACTION PURIDISCIPLINAIRE



Les enjeux scientifiques, technologiques et applicatifs sont nombreux, interconnectés et tous essentiels à la réussite du projet. Ainsi une des premières actions a été de réunir, autour de la thématique de l'exploration karstique, un ensemble d'acteurs dont les expertises complémentaires rendent possible cette aventure.

Les défis scientifiques sont portés par 4 laboratoires de l'Université de Montpellier

- HSM : Hydrogéologie
- LIRMM : Robotique subaquatique
- IES : Capteurs innovants
- MRM : Étude de l'Écosystème d'innovation des technologies robotiques pour la ressource eau.

L'expertise technologique est amenée par 2 entreprises spécialisées en robotique sous-marine, Reeds et Syera, souhaitant ouvrir leur offre à la commercialisation de services autour de l'exploration robotisée de milieux confinés, dont le karst.

L'expertise terrain est portée par une équipe de plongeurs spéléologues professionnels, dirigée par Frank Vasseur, pompier et formateur. Frank a la charge de constituer les équipes de plongeurs et de conduire les opérations plongées selon les protocoles spécifiques à chaque mission.

Les sites pilotes



L'identification de sites expérimentaux pertinents est essentielle au projet. En effet, si les premières expérimentations ont permis de valider certains concepts généraux (Gourneyras, Durzon, Saint Antoine), il nous faut maintenant mettre nos solutions à l'épreuve de la réalité du terrain et des besoins des gestionnaires. La cartographie des zones inconnues des sources du LEZ, principal livrable du projet LEZ 2020, est programmée pour la fin d'année 2022. D'ici là, l'ensemble des capteurs qui seront embarqués sur le robot doivent être validés, sur des sites présentant des spécificités morphologiques et physico-chimiques adéquates. La **Fontaine de Nîmes** est un site qui présente de nombreuses qualités pour éprouver le matériel en cours de test :

- facile d'accès pour l'acheminement du matériel et les modifications éventuelles de configuration entre deux immersions;
- documentation fiable (topographie réalisée après pompage, à pieds secs) et connaissance du conduit par les plongeurs intervenant;
- une faible profondeur et une température clémente qui sécurise les conditions de plongée;
- des ramifications et des alimentations diverses dans la première partie pour tester les instruments de mesures physico-chimiques;
- un conduit sinueux, avec des oscillations de profondeur, des sections calibrées et d'autres plus irrégulières;
- des galeries latérales et des cloches d'air

et qui de plus est un site d'entraînement régulier des collègues pompiers qui nous accompagnent tout au long de ce projet.

Les données expérimentales acquises vont aussi nous permettre de sélectionner parmi les sites déjà identifiés le site pilote sur lequel un modèle photogrammétrique (modèle très précis) sera réalisé afin de servir de 'réalité terrain' (MNT). Ce site pilote pourrait être une référence documentée pour les actions futures, nationales et européennes.

Les protocoles expérimentaux que nous avons mis au point nécessitent d'avoir accès au site sur 2 ou 3 périodes de 1 ou 2 jours dans l'année. Ils nous permettent de tester notre matériel (capteurs et robots) et de constituer une documentation inédite des sites visités.

La maturité technologique de nos systèmes ne nous permet pas encore de réaliser des explorations profondes mais cet objectif passe nécessairement par des tests intermédiaires sur les premières centaines de mètres du réseau karstique visité. Les modèles géomorphologiques acoustique et photogrammétrique, ainsi que toutes les autres données acquises pertinentes, seront bien sûr à la disposition des gestionnaires des sites.

Intérêts pour les problématiques locales

La Fontaine de Nîmes représente un **site d'intérêt scientifique national** puisqu'il est instrumenté et suivi en continu par le Service National d'Observation du Karst², initié par le CNRS et l'INSU, en partenariat avec le BRGM Occitanie à Nîmes. A ce titre l'aven de Mazaury, directement lié à la vasque de la Fontaine, est équipé de sondes de mesures automatiques de quantité et qualité d'eau. Ce site d'observation s'accompagne d'un réseau de mesures hydrologiques continues autour de la Fontaine (ESPADA) servant au service de vigilance crue de la ville.

- Intérêt quantitatif : la ville de Nîmes est sujette à des **problématiques de crues éclairs** dues au contexte karstique associé à la Fontaine. Il a en effet été montré que le sol et la roche sous-jacente avaient de faibles capacités d'emménagement de la pluie infiltrée, générant ainsi un rapide et important apport d'eau dans le réseau souterrain de conduits karstiques en cas de pluie intense. Il a été observé que, dans ces cas, les débordements de surface étaient souvent dus à des "rétro-inondations", c'est-à-dire une mise en charge des conduits provoquant une résurgence des eaux souterraines via les puits d'infiltrations. La présence d'étranglements dans le réseau de conduits principaux est suspectée d'être responsable de ce phénomène, néanmoins en l'absence d'une connaissance poussée de la géométrie des conduits et de l'hydraulique des écoulements, cette hypothèse n'a pas pu être validée. Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet à la Fontaine de Nîmes permettront de produire une **cartographie 3D du collecteur principal** jusqu'à la vasque de la Fontaine qui servira de base à la réalisation de simulations numériques précises de l'hydraulique au sein de ce collecteur. Nous serons ainsi en mesure de **localiser les zones du réseau contraignant les écoulements souterrains** lors des épisodes intenses de pluies, induisant ces mises en charges à l'amont.

- Intérêt qualitatif : l'eau de la Fontaine de Nîmes est **vulnérable aux pollutions ponctuelles**, notamment via les nombreux "puits" reliant directement la surface aux conduits karstiques en pleine ville. Le "puits Poubelle", situé le long de la route d'Alès et relié directement au drain souterrain, doit ainsi son nom au fait qu'il a été utilisé comme dépotoir sur de longues périodes. Soulignons les travaux engagés par la ville de Nîmes pour dépolluer le site et les effets notables sur la qualité de cette eau.

Dans le cadre de ce projet, nous prévoyons d'effectuer des largages de traceurs dans les conduits principaux et d'en mesurer la propagation jusqu'à la source. Ainsi, ces données, combinées au modèle géomorphologique issu du NavScoot, serviront à alimenter le modèle numérique afin de proposer des **simulations de propagation d'une pollution ponctuelle** au niveau de la Fontaine de Nîmes.

² <http://sokarst.org>

Programme expérimental

Le programme expérimental induit plusieurs missions, de difficultés croissantes, sur un même site. L'amélioration de nos systèmes, robots, capteurs et systèmes autonomes, est ainsi incrémentale et les données acquises lors d'une mission précédente servent de réalité terrain (de validation et de simulation) pour accroître l'ambition des nouvelles missions.

La première mission que nous souhaitons programmer (novembre/décembre) dans la Fontaine de Nîmes consiste à réaliser les tests nécessaires à la validation de l'architecture 'sensorielle' du robot, c.à.d. les capteurs, leur électronique et leur architecture informatique. Nous souhaitons mettre en œuvre notre nouvelle architecture acoustique (NavScoot) et tester un nouveau système photogrammétrique (Dodécam) encore en cours de réalisation. Cette mission expérimentale sera aussi l'occasion de valider différents principes technologiques relatifs à la réalisation d'un largeur de traceur autonome.

Ainsi cette première campagne expérimentale fournira deux Modèles Numériques de Terrain (MNT) des 200 premiers mètres du réseau karstique. Le premier modèle est acquis par les moyens acoustiques du NavScoot et le second bien plus précis (photogrammétrie) acquis par les 12 caméras du Dodécam. Il faut noter que si la mise en œuvre du Dodécam va dépendre de la turbidité de l'eau, le NavScoot lui n'est pas sensible à ce phénomène.

La suite des capteurs du NavScoot comprend :

- Un sonar profilométrique vertical, Super Seaprince de chez Tritech
- Un sonar profilométrique horizontal, Ping 360 de chez Blue Robotics
- Un DVL, DVL1000 de chez Nortek
- Une centrale d'attitude, BNO055 de chez BOSCH
- Un Capteur de pression, profondimètre de chez Blue Robotics.
- Une interface de commande 'Dive Angel'.

Le Dodécam embarque :

- 12 caméras, RX0 de chez Sony
- 16 projecteurs conçus spécifiquement et en cours de réalisation
- Une centrale d'attitude, BNO055 de chez BOSCH
- Un Capteur de pression, profondimètre de chez Blue Robotics.
- Une interface de commande 'Dive Angel'.

Nous prévoyons que ces essais consistent en 3 plongées de 200m dans le conduit depuis la vasque. Les différents systèmes de capteurs (NavScoot et Dodecam) seront montés sur un scooter de plongée et manipulés par un plongeur. Une interface (Dive Angel) lui permettra de déclencher les acquisitions et de monitorer le bon déroulement de l'échantillonnage. Ces trois plongées peuvent s'effectuer sur une même journée.

Les données acquises seront ensuite traitées en laboratoire et exploitées pour améliorer nos systèmes robotiques. Les modèles ainsi réalisés seront exploités pour dimensionner la mission expérimentale suivante qui verra non seulement la validation des systèmes robotiques améliorés, mais aussi la réalisation d'un largage de traceur adapté à la morphologie spécifique du site. Ces données spécifiques permettront d'alimenter un modèle de propagation réaliste et validé in situ.

Une troisième campagne expérimentale peut être envisagée en fonction des améliorations validées et de l'intérêt des instances gestionnaires du site pour réaliser des explorations plus profondes.

Écosystème du projet et contacts

ECOSYSTEME



PEOPLE INVOLVED

- LIRMM
 - Lionel Lapierre
 - Didier Crestani
 - René Zapata
 - Jean Triboulet
 - Sébastien Druon
 - Gilles Trombettoni
 - Karen Godary-D
 - Dang Huu Tho
 - Quentin Massone
 - Rodolfo Villalobos
 - Verlein Radwan
 - Yohan Breux
- ENSTA
 - Simon Rohou
- HSM
 - Hervé Jourde
 - Pierre Fischer
 - Pascal Brunet
- BRGM
 - J.C. Maréchal
 - V. Bailly-Comte
- IES
 - Franck Augereau
 - Didier Laux
 - Arnaud Véna
 - Mohammad Alarab
- IMAG
 - Bijan Mohammadi
 - André Mas
- LEM/MRM
 - Saïd Yami
 - Gérald Naro
- 3M
 - Arnaud Vestier
 - Adélaïde Kasolter
- Céladons
 - Frank Vasseur
- PlongéeSout
 - Rémi Bouchard
- Companies
 - Luc Rossi (Syera)
 - Benoit Ropars (Reeds)
 - Hydrokarst

Contact : Lionel Lapierre (lapierre@lirmm.fr), Frank Vasseur (celadons@free.fr)