

Titre : Réalisation d'un système robotique polyarticulé subaquatique de type anguilliforme, et doté de propulseurs

Contexte : Cette thèse s'inscrit dans les travaux relatifs au projet ANR ElectroKarst. Cette proposition est un projet d'étape d'une initiative de recherche consacrée au développement de systèmes robotisés pour l'exploration karstique.

Les enjeux de l'utilisation de robots pour l'exploration karstique : 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 Robotique, Électronique (capteurs), Informatique, Mathématique, et bien sûr hydrogéologique de haut niveau.

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 que cette **solution robotique** aura sur les questions de **l'évaluation, de la protection et de la prospection de la ressource en eau**, elle contribuera aussi à la 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 de nombreuses régions, dont l'Occitanie lors des épisodes cévenols, subissent en cette période de changement climatique.

Une vue historique rapide de l'utilisation des robots dans l'exploration karstique : Les premiers essais documentés sur l'utilisation de systèmes robotiques dans les environnements karstiques datent des années 1960, lorsque le Commandant Cousteau et H. Delauze ont utilisé le Télénaut pour une exploration de la Fontaine de Vaucluse. Ils ont ainsi initié une série d'expéditions dont les échecs successifs furent riches en enseignements : les robots furent successivement perdus, les derniers étant pris dans les restes des câbles ombilicaux des précédents. Ainsi, la question de la gestion du câble ombilical reliant les robots à la surface est essentielle dans cet environnement confiné et non structuré. Une solution pourrait être de s'en passer. C'est l'approche choisie par les trois projets actuels dont les objectifs scientifiques et applicatifs sont proches de l'initiative REK : UnexMin et son successeur UnexUp, ainsi que DepthX. Les deux premiers projets proposent de développer un système autonome pour inspecter d'anciennes mines inondées afin de décider de leur réouverture. Il s'agit d'un environnement structuré, sans courant, et dans lequel l'eau est supposée rester claire. DepthX est conçu pour effectuer une cartographie acoustique des artefacts géologiques tels que les cénottes, de gigantesques gouffres verticaux noyés. La morphologie verticale des cénottes permet une solution robotique autonome, en raison de la simplicité de la trajectoire et de la communication acoustique directe et verticale possible entre la machine et le système de supervision, en surface.

Systèmes sous-marins polyarticulés : La bio-inspiration a produit de nombreux designs intéressants pour les systèmes sous-marins. De la nageoire d'anguille (McIsaac, 2003 – Khalil, 2007) au thon (Wolfgang, 1999), l'idée d'explorer de nouveaux types de locomotion en s'inspirant de solutions naturelles a conquis les esprits scientifiques du monde entier. Mais, pour le moment, du point de vue de la performance énergétique, aucune solution n'a montré une efficacité supérieure à celle de l'utilisation d'une hélice rotative sous l'eau. Pendant ce temps, une autre propriété intéressante d'un système polyarticulé en série est sa capacité à changer de forme et de configuration d'actionnement lorsqu'on y monte des hélices. Le système Eelume (Liljebäck, 2017) suit la même idée et propose un robot compact et hautement maniable, dédié à l'inspection et à la maintenance des infrastructures en eaux profondes. La nouveauté de notre design sera d'adapter l'ensemble des capteurs nécessaires à l'exploration karstique, d'optimiser la configuration du système d'actionnement pour gérer activement

la maniabilité, la force atteignable, la réactivité et la consommation d'énergie en fonction des conditions et des contraintes environnementales. De plus, comme expliqué ci-après, l'adjonction du principe de perception électrique imposera également de nouvelles contraintes sur la forme du système. Enfin, la conception de l'architecture de contrôle de l'ensemble du système soulève des questions scientifiques originales et passionnantes sur le contrôle du système d'actionnement redondant (composé d'articulations de configuration et de propulseurs) qui couple efficacité d'actionnement et capacité d'observation.

Organisation des travaux de thèse : les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse sont dédiés à la conception et à l'ingénierie du robot sous-marin, appelé ElectroKarst Explorer (EKE), qui intégrera les développements des partenaires et héritera des conclusions de recherches précédentes. Ce système sera composé de différents éléments reliés en série avec une articulation composée de 2 axes de rotation perpendiculaires et concurrents contrôlés. Des propulseurs sous-marins (au moins 8) seront installés sur le système, qui pourra modifier dynamiquement la géométrie de ses capacités d'actionnement. Comme réalisé dans (Dang, 2021), une géométrie optimale peut être identifiée pour favoriser certaines propriétés telles que la réactivité, la consommation minimale d'énergie et l'isotropie. De plus, l'approche de gestion active de la redondance appliquée dans (Ropars, 2018) sera utilisée et articulée avec l'optimisation de la géométrie afin d'améliorer les performances du système. L'effet de la variation de la géométrie sur la performance de la perception électrique sera également pris en compte dans le processus d'optimisation, couplant ainsi de manière intéressante les propriétés d'actionnement avec la performance d'observation. Les travaux s'articulent autour de 4 tâches :

Tâche 1.1 : Conception et fabrication du système (T0 -> T0+26). Cette tâche est dédiée à :

- la conception du système qui doit inclure différentes contraintes telles que : compacité, modularité, réactivité, installation des capteurs, électronique distribuée (contrôle et puissance), installation et placement des dispositifs de perception électrique, génération de champ électrique...
- la fabrication du système : fabrication, assemblage, tests...

Livrables : D-1.1.1 Plans de conception, T0+7 ; D-1.1.2 Rapport sur l'électronique de l'EKE, T0+12

Tâche 1.2 : Optimisation de la géométrie du système (T0+12 -> T0+24). La considération simultanée des différents critères liés à la manœuvrabilité et à l'observabilité du système conduira à un problème d'optimisation qui devra être résolu en ligne, selon les conditions environnementales. Par exemple, un fort courant dû à une réduction de section de la galerie karstique déclenchera une configuration des propulseurs optimisant la capacité d'actionnement pour faire face au courant, tandis que la configuration des capteurs ou la morphologie de l'environnement peuvent exiger une autre forme. D'autre part, l'exploration d'une grande caverne nécessite une capacité d'actionnement omnidirectionnelle et l'utilisation de capteurs acoustiques (la portée de la perception électrique ne sera pas suffisante), tandis qu'une visite de galerie étroite incitera le système à suivre la galerie en adaptant sa forme à la courbure de celle-ci. Ce problème d'optimisation en ligne sera considéré comme un objectif de guidage qui devra également gérer des commutations discontinues en utilisant des fonctions de transition.

Livrable : D-1.2 Rapport sur les fonctions de guidage pour les formes optimales de l'EKE et les fonctions de transition, T0+24

Tâche 1.3 : Conception et mise en œuvre du guidage et du contrôle (T0+24 -> T0+48). La question du contrôle est double : le contrôle de la forme du système et le contrôle des propulseurs. Ces deux sous-problèmes sont évidemment couplés et la structure de contrôle globale doit être étudiée avec soin. En effet, bien qu'une approche classique de suivi de trajectoire soit adaptée aux contraintes karstiques (Lapierre, 2021), le couplage avec un comportement réactif (centrage autonome provenant de l'analyse de la perception électrique) peut apparaître délicat. Une adaptation de l'approche proposée dans (Lapierre, 2007) sera étudiée. De plus, la géomorphologie de l'environnement (galeries étroites ou grandes cavernes) aura un impact considérable sur l'efficacité de la perception électrique (portée limitée) et sur la stratégie de guidage.

Livrable : Rapport sur l'architecture complète de contrôle et de guidage avec fonctions de jonction pour gérer les commutations difficiles, T0+48.

Tâche 1.4 : Tests préliminaires et démonstration de la POC en milieu naturel. Cet objectif reprend les validations intermédiaires relatives à la conception du robot, ainsi que les tests qui seront effectués en environnement naturel. Les différentes contributions des partenaires devant être intégrées au système, les dates prévues pour ces tests seront déterminées durant la réalisation du projet.

Organisation de la thèse : cette thèse est financée par le projet ANR ElectroKarst, hébergé au laboratoire LIRMM de l'Université de Montpellier. Le candidat sera inscrit à l'école doctorale I2S de l'Université de Montpellier. Le lieu de réalisation des travaux sera à l'ENSTA Bretagne de Brest. L'équipe encadrante sera composée de : L. Lapierre (Directeur, 40%), L. Jaulin (co-Directeur, 30%), F. Le Bars (encadrant, 30%). Les travaux de thèse sont prévus pour être réalisés entre le 1er septembre 2024 et le 31 août 2027.

Références :

- Mclsaac, K.A. , J.P. Ostrowski. "Motion planning for anguilliform locomotion". IEEE TRO 19(4): 637-652 (2003).
- Khalil, W. , G. Gallot, F. Boyer. "Dynamic Modeling and Simulation of a 3-D Serial Eel-Like Robot". IEEE TR Man & Cyb., 37(6):1259-1267 (2007).
- Wolfgang, M. J. , "Hydrodynamics of flexible-body swimming motions", Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of technology, June 1999.
- Liljebäck, P. and R. Mills, "Eelume: A flexible and subsea resident IMR vehicle," OCEANS 2017 - Aberdeen, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/OCEANSE.2017.8084826.
- Dang, T. , L. Lapierre, R. Zapata, B. Ropars, P. Lepinay, 'Over-Actuated Underwater Robots: Configuration Matrix Design and Perspectives', Sensors, MDPI, 2021, 21(22), pp. 7729. doi: 10.3390/s21227729
- Dang, H, L. Lapierre, R. Zapata, P. Lepinay and B. Ropars, "Dynamic Configuration for an Autonomous Underwater Robot," 2020 28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Saint-Raphaël, France, 2020, pp. 520-525, doi: 10.1109/MED48518.2020.9183057.
- Lapierre L., Zapata R., Lepinay P., ' Combined Path-following and Obstacle Avoidance Control of a Wheeled Robot', International Journal of Robotics Research, 26: 4, 361-375, 10.1177/0278364907076790, 2007
- Lapierre, L. , R. Zapata, P. Lepinay, B. Ropars, 'Karst Exploration: Unconstrained Attitude Dynamic Control for an AUV', ELSEVIER Ocean Engineering, Volume 219, 2021,108321, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108321>
- Ropars B., Lapierre L., Lasbouygues A., Andreu D and Zapata R. 'Redundant Actuation System of an Underwater Vehicle', in the Elsevier Journal of Ocean Engineering, Volume 151, March 2018, pp. 276-289