

Convention de subvention DGA-DS/ENSTA Bretagne
n°2012.60.0010.00.470.75.01
Année 2014-2015 - fourniture 2

Etude n°1 : Calcul ensembliste pour la robotique marine et sous-marine

F. Le Bars, C. Aubry, S. Rohou, B. Desrochers, J. Nicola, M. S. Ibn Seddik, L. Jaulin

Descriptif de l'étude

Dans le cadre de cette étude, nous cherchons à réaliser des plateformes robotiques marines, sous-marines, terrestres et aériennes dans le but de valider des concepts et algorithmes divers, notamment en utilisant des méthodes ensemblistes telles que le calcul par intervalles. Les thématiques liées à ce projet sont variées : réalisation de robots simples, peu coûteux et robustes, téléopération, autonomie, régulation, validation, localisation robuste, SLAM (Simultaneous Localization And Mapping), détection et reconnaissance d'objets, cartographie, collaboration entre robots hétérogènes... Ce thème de recherche a été initié par la thèse DGA de Fabrice LE BARS soutenue en 2011 sur la robotique sous-marine (cartographie, localisation), continué à travers la thèse d' Aymeric BETHENCOURT soutenue en Septembre 2014 sur le SLAM par meute de robots, le post-doc de Vincent DREVELLE sur l'exploration sous-marine par meute de robots, les thèses de Simon ROHOU et Benoit DESROCHERS, qui viennent de débuter en Septembre-Octobre 2015 et le post-doc de Clément AUBRY. De plus, d'autres projets et thèses sont étroitement liés à ces travaux. L'évaluation des algorithmes développés est assurée par la participation d'équipes de l'ENSTA Bretagne à plusieurs concours ou défis dont SAUC-E (robotique sous-marine), euRathlon (robotique terrestre en 2013, sous-marine en 2014, combiné terrestre, aérien, marin et sous-marin en 2015) et WRSC (robots à voile et à moteur).

Voici les principaux travaux prévus pour cette année :

- euRathlon 2015 (www.eurathlon.eu). Comme l'année dernière, les concours SAUC-E et euRathlon seront regroupés en Italie. La nouveauté cette année sera que les épreuves nécessiteront des robots sous-marins, marins, terrestres et aériens, autonomes ou téléopérés. L'idée sera d'être capable de détecter et localiser des éléments pouvant être dans l'eau, sur terre et à l'intérieur de bâtiments, et de donner un maximum d'informations sur la zone explorée. Nous y présenterons nos AUVs (Autonomous Underwater Vehicles) SAUC'ISSE et SARDINE, un nouvel AUV en construction (dans le cadre de la thèse de Simon ROHOU), notre ancien robot terrestre construit pour le concours ETAS (et réutilisé pour euRathlon 2013), ainsi que de nouveaux robots terrestres et aériens construits par des étudiants.
- WRSC/IRSC 2015 (compétition et conférence de robotique marine de surface autonome) aux Aland Islands, Finlande : un nouveau robot voilier de 2 m est en construction et un plus petit voilier téléguidé existant est en cours d'automatisation.

- Projets étudiants : projet de drone aéro-sous-marin, interception de drones, robots humanoïdes NAOs, Coupe de France de Robotique... Ces petits projets et concours sont de bons moyens pour initier les étudiants à la robotique, tester de nouvelles approches, réfléchir à de nouveaux problèmes.
- EASIBEX : pour simplifier au maximum l'utilisation du calcul par intervalles et des contracteurs pour des novices, EASIBEX-MATLAB et EASIBEX-CPP ont été mis au point. L'idée est de permettre à des étudiants ou scientifiques ne connaissant pas encore bien le calcul par intervalles ni les langages et paradigmes de programmation avancés (C++, Python, programmation orientée objet...) d'utiliser les possibilités d'IBEX (www.ibex-lib.org) à travers des fonctions très simples en MATLAB ou C++.
- Localisation de sous-marins : des améliorations des algorithmes de localisation par sonar dans un environnement connu en utilisant le calcul par intervalles actuellement utilisés sur les sous-marins SAUC'ISSE et SARDINE sont prévues. Par ailleurs, d'autres algorithmes de localisation et cartographie en meute sont aussi en développement, et correspondent aux travaux liés à la thèse de Simon ROHOU et le post-doc de Clément AUBRY.

euRathlon 2015 et robotique sous-marine

Nous prévoyons cette année de participer aux concours euRathlon 2015 et SAUC-E 2015, qui sont regroupés à Piombino, Italie du 17 au 25 Septembre 2015. Cette édition du concours euRathlon devrait être la dernière de ce projet européen de 3 ans et proposera des épreuves impliquant de la robotique sous-marine, marine, terrestre et aérienne. La partie sous-marine comportera un classement supplémentaire réservé aux équipes étudiantes et constituera le concours SAUC-E 2015, les équipes non-étudiantes étant sur un classement distinct comptant pour euRathlon (voir www.eurathlon.eu). Le scénario de cette année simulera une situation où une centrale nucléaire au bord de l'eau vient de subir des dégâts majeurs (fuites de pipelines, effondrements de bâtiments suite à un tremblement de terre ou tsunami, etc.). Les robots seront utilisés pour détecter et localiser des objets particuliers pouvant être dans l'eau, à l'extérieur ou à l'intérieur de bâtiments, ainsi que récupérer un maximum de données sur l'état de la zone, avec un maximum d'autonomie.

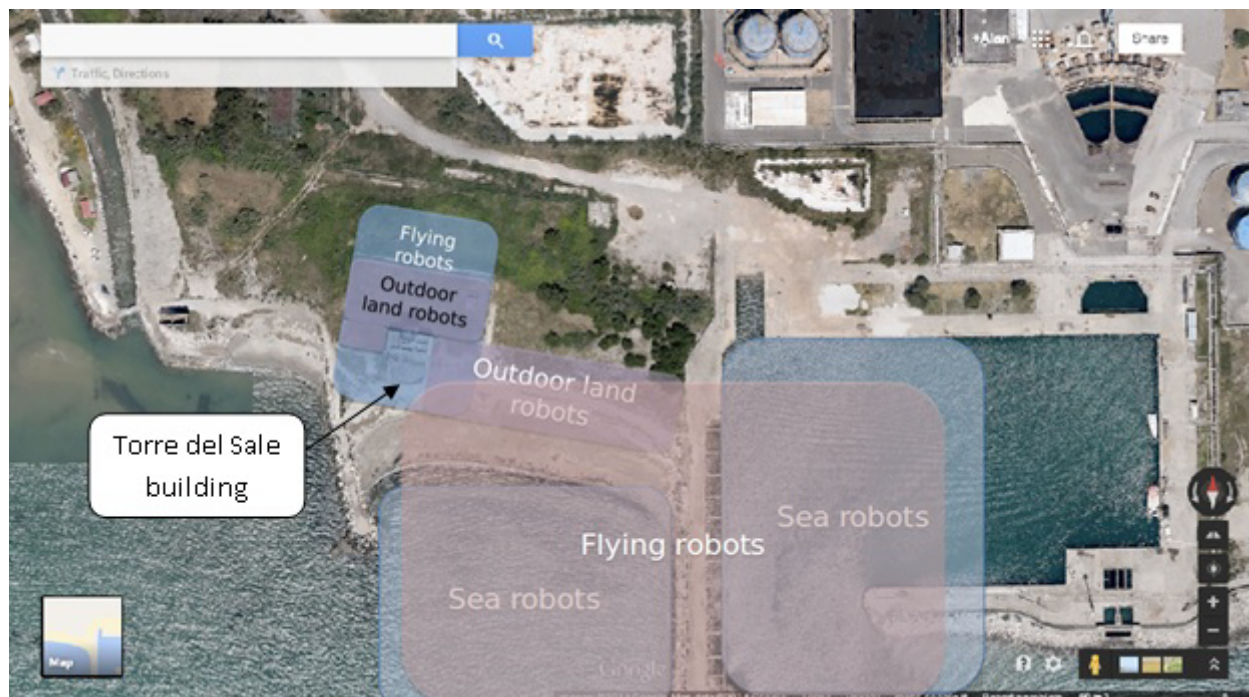


Figure 1 : Zone de la compétition euRathlon 2015.

En lien avec le concours et les travaux de thèse de Simon ROHOU et de post-doc de Clément AUBRY, un nouveau robot sous-marin est actuellement en construction. Son but sera à terme d'être construit en plusieurs exemplaires pour pouvoir effectuer des expériences de meutes de robots en mer.

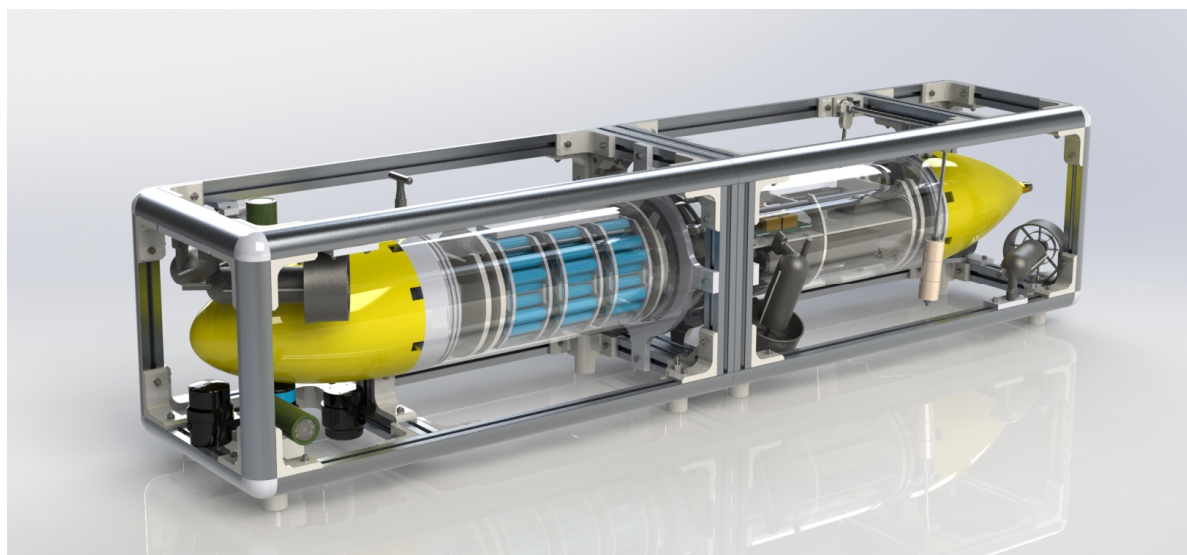


Figure 2 : Modélisation 3D de TOUTATIS, nouveau robot sous-marin en construction.

Ce nouveau type de robot pourra être contrôlé sur ses 6 degrés de liberté, sera modulaire en pouvant être séparé en 2 au milieu pour remplacer une de ses moitiés (e.g. remplacer la moitié contenant les batteries par une autre moitié plus petite sans batterie pour fonctionner en mode ROV, ou rajouter un compartiment supplémentaire entre les 2 compartiments standards...) pourra être équipé de tous les capteurs actuellement utilisés sur nos robots existants, pourra se poser sur le fond marin si nécessaire (cf sujet de thèse de Simon ROHOU, avec une stratégie de localisation en meute « pas-à-pas »), etc. Il devrait

notamment être plus pratique pour une utilisation en mer que notre meute de robots CISCREA, qui est plus adaptée à une utilisation en piscine.

De plus dans le cadre de notre collaboration avec l'UMI LAFMIA (Mexico), nous allons peut-être pouvoir utiliser l'un de leurs robots sous-marins avec les nôtres pour le concours et sa préparation. Leur sous-marin ayant des caractéristiques très similaires aux nôtres, nous devrions facilement pouvoir travailler dessus.

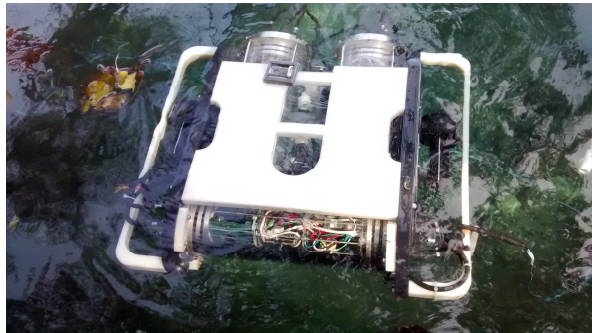


Figure 3 : AUV LIRMIA III de l'UMI LAFMIA, Mexico.

Notre robot de surface bateau à moteur est aussi en cours de mise à jour. Un nouveau système de propulsion est en train d'être installé pour résoudre les divers problèmes rencontrés les années précédentes (principalement l'étanchéité). Celui-ci devrait servir de relais de communication (entre acoustique sous-marine et Wi-Fi) ainsi que d'aide à la localisation pour les sous-marins lors des compétitions. Celui-ci devrait aussi être présenté en démonstration lors du Forum Innovation DGA 2015.



Figure 4 : Bateau à moteur autonome qui sera utilisé à euRathlon 2015 et au Forum Innovation DGA 2015.

Les robots sous-marins SAUC'ISSE et SARDINE, ainsi que notre 2^{ème} robot de surface hovercraft devrait aussi être utilisé comme l'année dernière pour euRathlon.

Pour la partie terrestre, plusieurs nouveaux robots différents sont actuellement mis au point :

- Un petit robot à chenille basé sur plateforme mécanique commerciale à bas coût. Il servira de robot principal pour l'exploration du bâtiment inconnu (ainsi que de support pour le quadrirotor d'intérieur, notamment pour les calculs et le stockage de données) et sera équipé d'un Ardupilot, une caméra distante 5.8 GHz, un PC, télémètre laser rotatif Hokuyo, télémètres sonar à bas cout et une Kinect. Bien qu'il soit prévu d'être

principalement téléopéré pendant la compétition, il sera capable d'effectuer quelques missions autonomes simples (notamment suivi de points GPS en extérieur).

- Un buggy, servant de relais de communication (répéteur Wi-Fi ou lien vidéo 5.8 GHz). Sa base mécanique vient d'un véhicule téléguidé de moins de 50 cm de long et son architecture électronique sera basée soit sur un Ardupilot, soit un smartphone sous Android. Il devrait être placé manuellement à des positions stratégiques (e.g. entrées du bâtiment) pour maximiser les capacités de communication entre la station de contrôle et les robots principaux d'exploration.

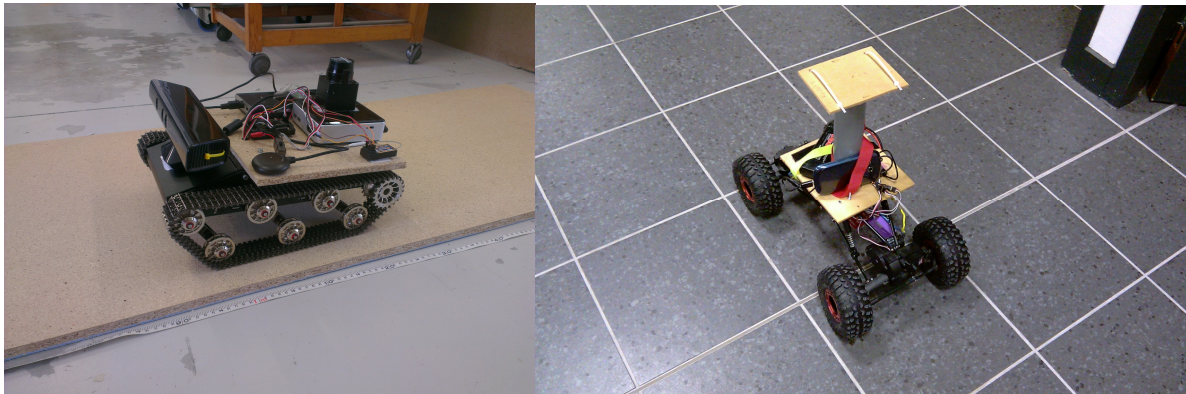


Figure 5 : TREX pour l'exploration d'un bâtiment et buggy servant de relais de communication.

2 différents quadrirotors sont en construction pour la partie aérienne du concours:

- Un quadrirotor d'intérieur. Ses dimensions permettent de passer par des portes standards et il est protégé pour pouvoir toucher les murs sans dommages. Un Ardupilot devrait gérer le contrôle bas niveau (stabilisation de l'attitude grâce à l'AHRS intégrée, stabilisation de l'altitude avec des télémètres laser/ultrasons verticaux, stabilisation de la vitesse avec un capteur de flux optique et positionnement en extérieur avec le GPS) combiné avec un petit ordinateur embarqué pour récupérer et analyser les données d'un télémètre laser rotatif Hokuyo, une Kinect et/ou une caméra. Vu que les contraintes de taille, poids, et énergie sont extrêmes, la plupart des données devraient être directement transférées par Wi-Fi vers un robot roulant ou la station de contrôle et peu de traitement de données devrait être possible à bord. Les fonctions d'autonomie de l'autopilote devraient être principalement utilisées comme aide au pilotage à distance, et les autres données de trajectoire et cartographie devraient être principalement traitées offline.
- Un quadrirotor d'extérieur. Celui-ci devrait être optimisé pour les longues distances et longues missions plutôt que la taille. Seuls les capteurs intégrés de manière standard avec l'Ardupilot et la caméra devraient être utilisés pour construire une carte vidéo 2D (à partir de la camera) et 2.5D avec information de relief (à partir du laser utilisé pour la stabilisation de l'altitude, avec une portée d'environ 20 m) de la zone couverte. Un petit ordinateur ou un smartphone pourraient aussi être embarqués pour essayer de détecter automatiquement les OPIs.

Des cartes 2D des zones à explorer devraient être fournies par sonar pour les parties marines et par laser ou caméra sur terre ou dans les airs. Les informations d'altitude à l'extérieur du bâtiment par robots aérien permettront de fournir des cartes 2.5D avec information de relief des alentours du bâtiment et la Kinect des robots terrestres donnera en plus une cartographie 3D à l'intérieur (ccny_rgbd_tools ROS package). Les OPI (Object of Potential Interest) devraient être principalement détectés par filtre HSV (sélection par la couleur) ou par repérage de points d'intérêts spécifiques à l'OPI. Un traitement offline à la fin des missions sera fait manuellement ou de manière semi-automatique pour retirer un maximum d'informations des détections et données récupérées par les robots (e.g. détection manuelle des numéros sur les OPIs, correspondances entre images, positions, etc.) ainsi que l'amélioration de l'estimation de trajectoire et la cartographie.

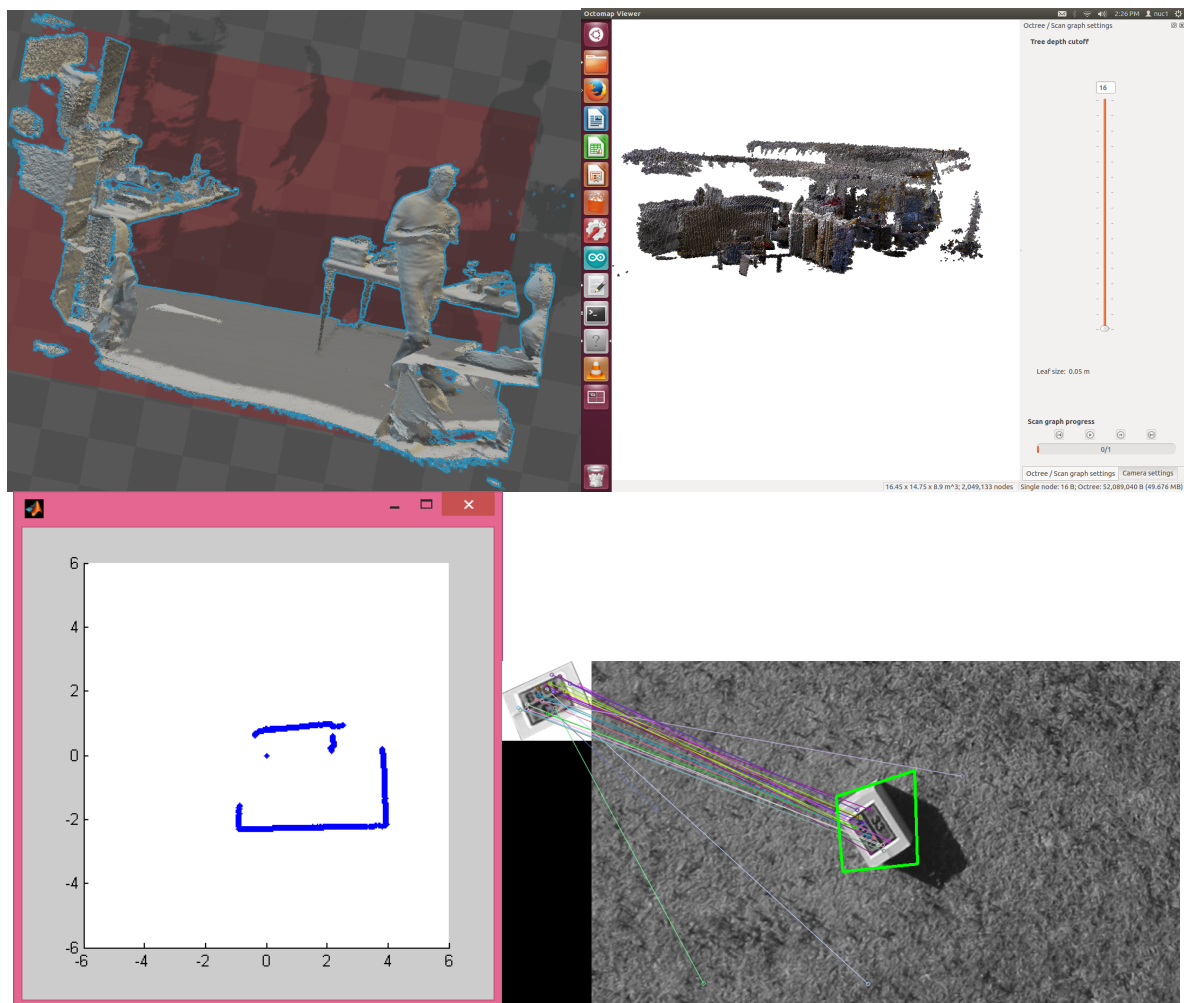


Figure 6 : Reconstructions 3D avec une Kinect, image d'une pièce avec un télémètre laser rotatif Hokuyo et détection d'OPI (Object of Potential Interest) pour euRathlon.

La WRSC/IRSC 2015 (compétition et conférence de robotique marine de surface autonome) aura lieu aux Aland Islands, Finlande du 31 Août au 4 Septembre 2015 (voir www.wrsc2015.com). Les épreuves devraient être similaires à celles des années précédentes, avec quelques restrictions (e.g. il n'y aura pas de catégorie pour les bateaux à moteur). Les mêmes algorithmes que ceux utilisés pour le voilier autonome VAIMOS [1] sont actuellement en cours d'adaptation sur un voilier plus petit muni de capteurs à plus bas coût (notamment le capteur de vent).

De plus, un bilan de notre organisation de la WRSC/IRSC 2013 a été présenté à la conférence OCEANS 2015 à Gênes, Italie le 20 Mai 2015, dans la session spéciale Education and Competition Initiatives in Marine Robotics [2]. Cette conférence a aussi été une bonne occasion pour voir les travaux de nombreux autres chercheurs et industriels en robotique marine et d'avoir une meilleure vision des points bloquants actuels qui nécessitent d'être étudiés en particulier.

Travaux supplémentaires

Pour préparer de futures expériences impliquant plusieurs robots sous-marins communiquant entre eux ainsi que les futurs travaux de Thomas LE MEZO sur les drones dérivants, plusieurs tests ont été effectués en mer pour tester différentes configurations possibles. Un protocole de communication a été développé pour pouvoir utiliser simplement et efficacement nos modems Trittech sur 4 bouées dérivantes, pour pouvoir communiquer des données et mesurer des distances inter-robots. Chaque bouée était munie d'un modem acoustique Trittech, d'un GPS, d'un PC contrôlant le tout, ainsi que d'un smartphone envoyant régulièrement des SMS pour indiquer la dernière position connue des bouées (pour éviter de les perdre, la rade de Brest étant assez bien couverte par la 3G).

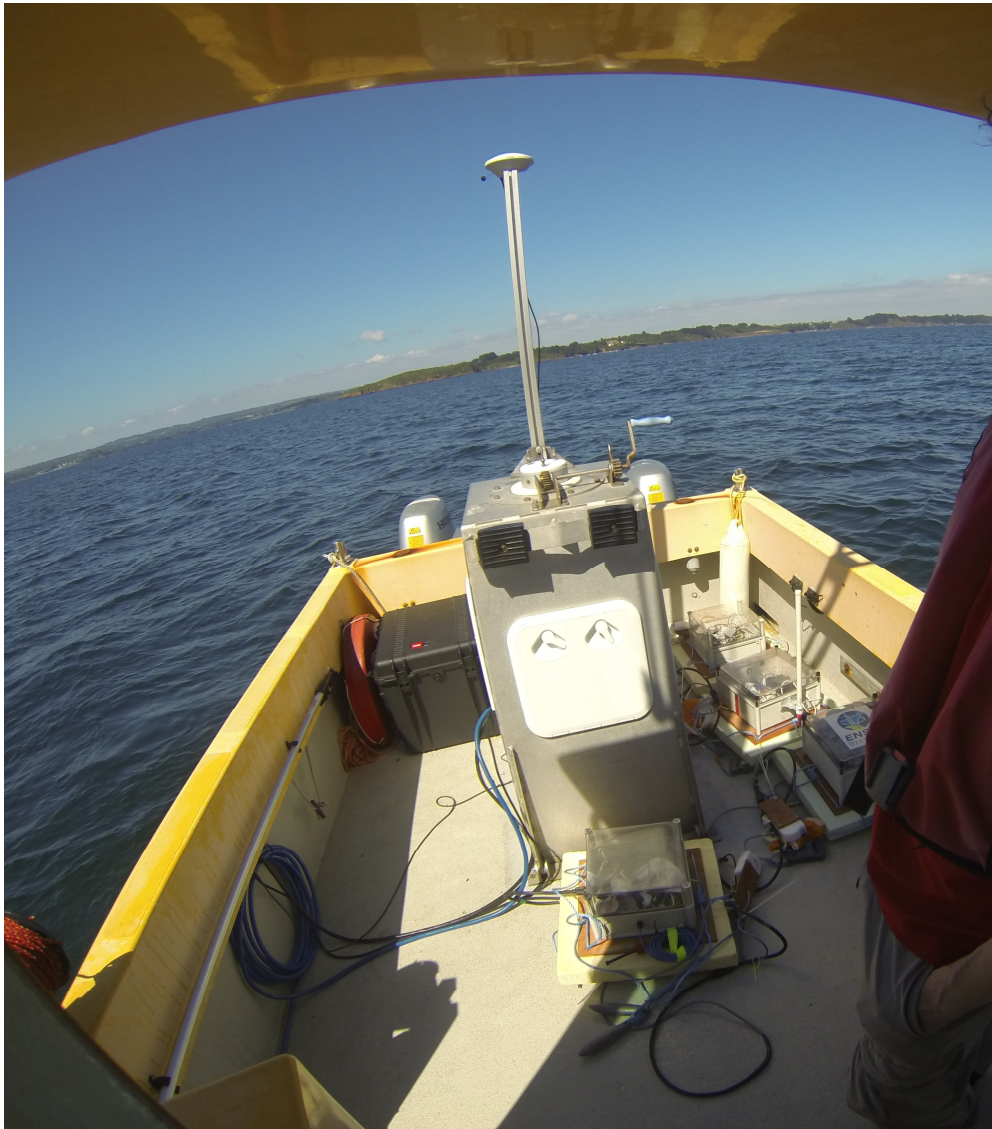


Figure 7 : Les 4 bouées dans la Panopée, puis en train d'être mises à l'eau.

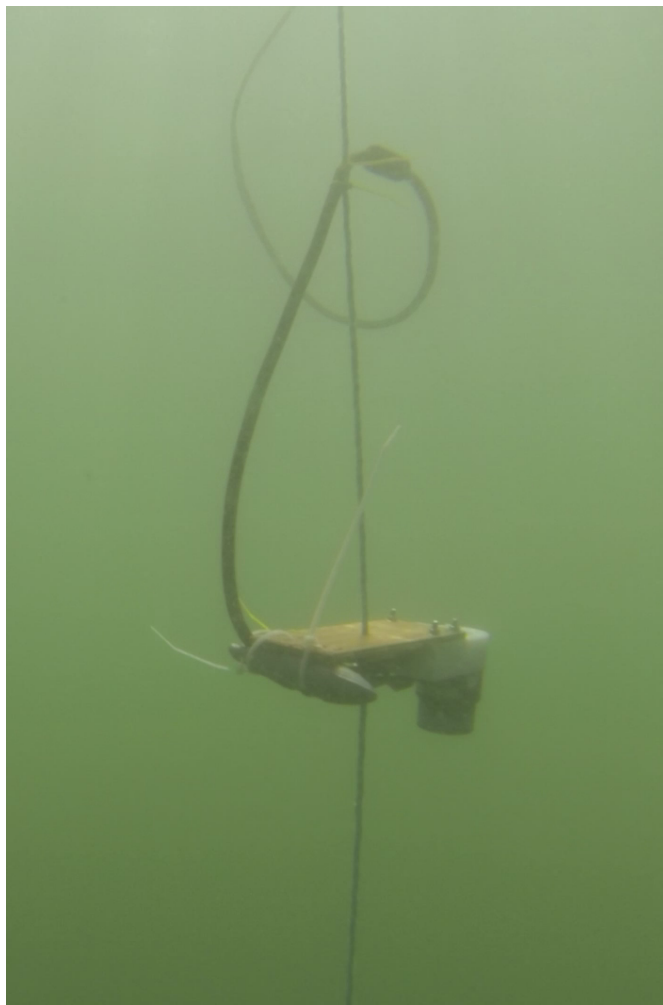


Figure 8 : Modem acoustique Tritech installé sous chaque bouée. Ce type de modem à bas coût n'étant pas fait à l'origine pour fonctionner correctement à 4, un dispositif a été mis au point pour l'allumer et le reconfigurer automatiquement pour pouvoir effectuer les mesures de distances souhaitées.

Voici les résultats d'une des premières expériences (29 Juin 2015).

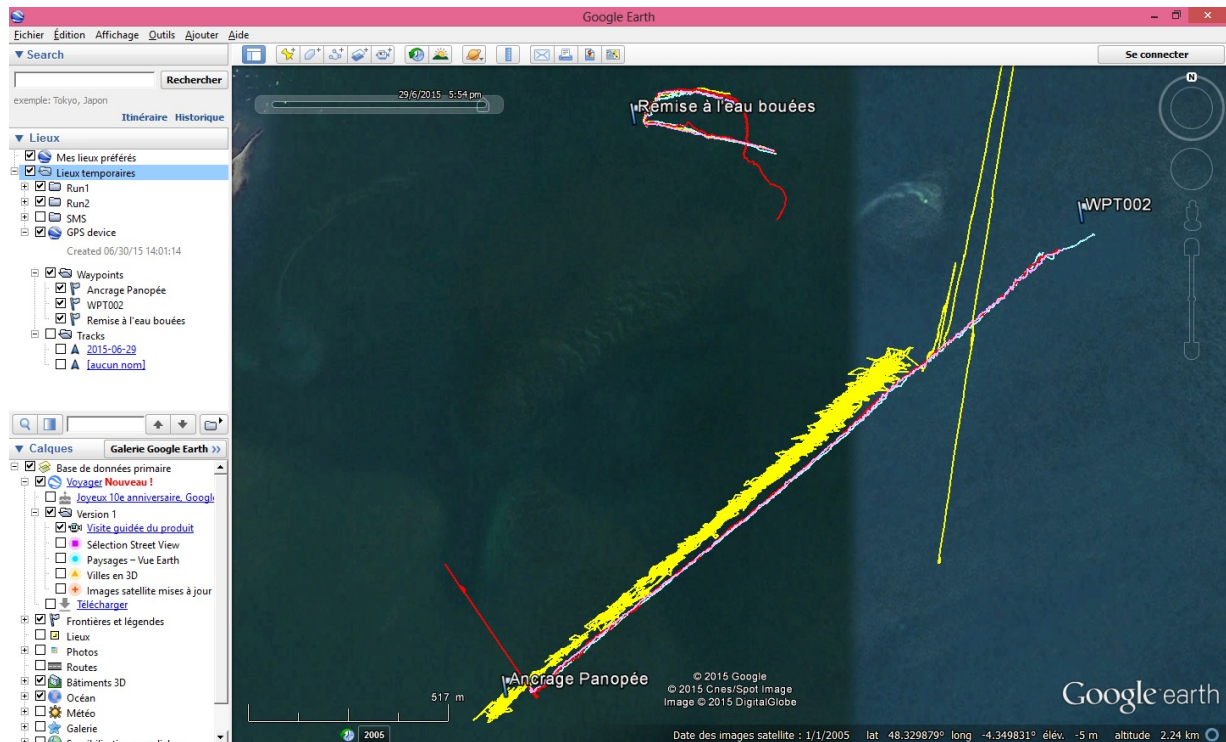


Figure 9 : Dans cette expérience (29 Juin 2015), les 4 bouées ont été mises à l'eau au même endroit en rade de Brest et ont été laissées à la dérive pendant environ 2 fois 2h. Les tracés de différentes couleurs correspondent aux coordonnées GPS de chaque bouée. Pendant toute l'expérience, des distances étaient mesurées par acoustique avec les modems. Les trajectoires semblent cohérentes avec les modèles de courant, et les distances mesurées par acoustique correspondaient aussi aux positions relevées par GPS (les 4 bouées sont restées très proches pendant toute l'expérience).

Après corrections de divers problèmes remarqués pendant l'expérience, une nouvelle expérience dans des conditions différentes a été faite le 1^{er} Juillet 2015. Cette fois-ci, les bouées ont été lancées à environ 200 m, et l'une d'entre elle a été attachée à notre bateau de suivi (La Panopée) pour surveiller en direct les données échangées via la communication acoustique.

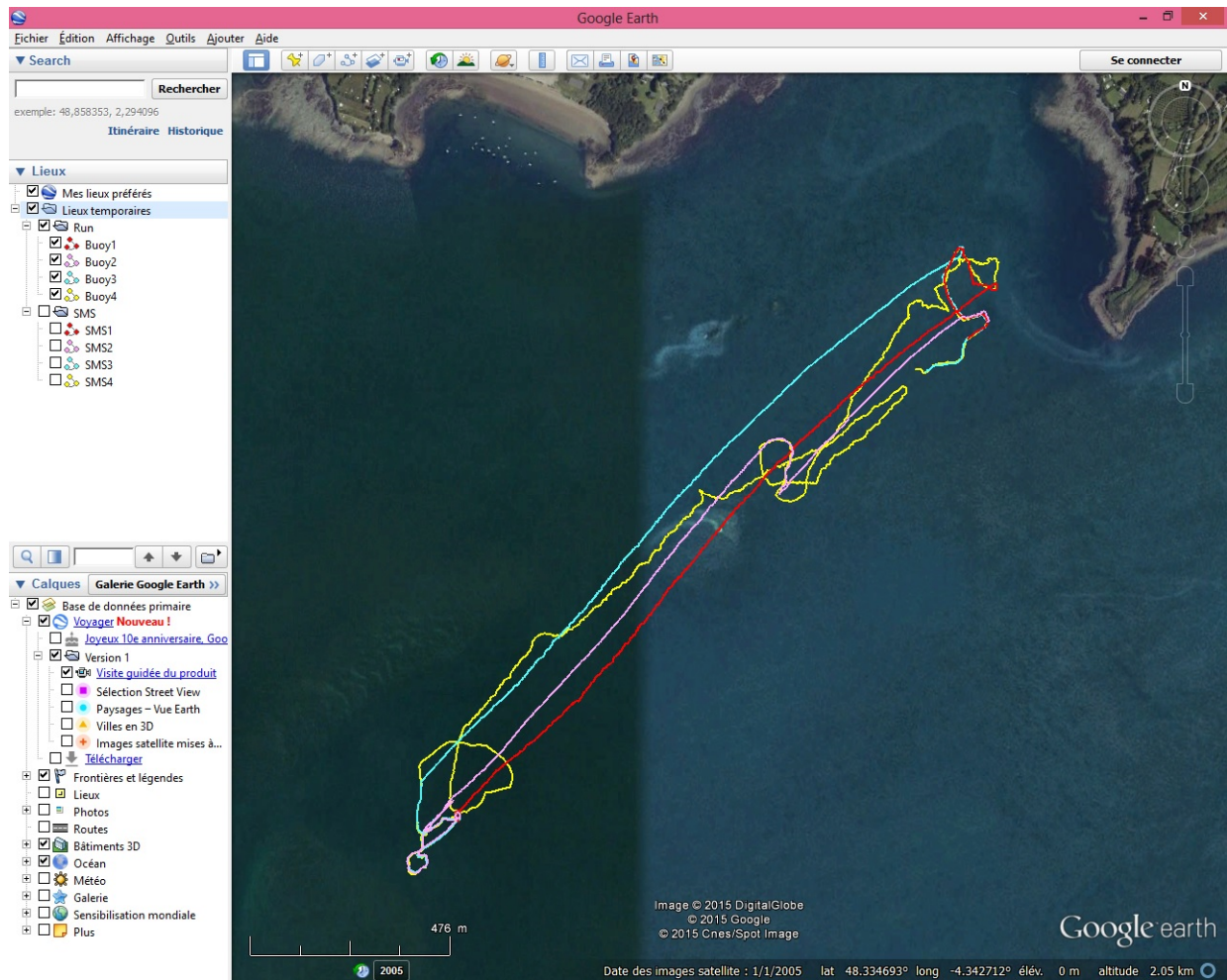


Figure 10 : Dans cette expérience (1er Juillet 2015), les 4 bouées ont été mises à l'eau à des endroits différents et ont été laissées à la dérive pendant 2h. Les tracés de différentes couleurs correspondent aux coordonnées GPS de chaque bouée. Pendant toute l'expérience, des distances étaient mesurées par acoustique avec les modems, l'une des bouées (en jaune) étant attachée au bateau de suivi (La Panopée).

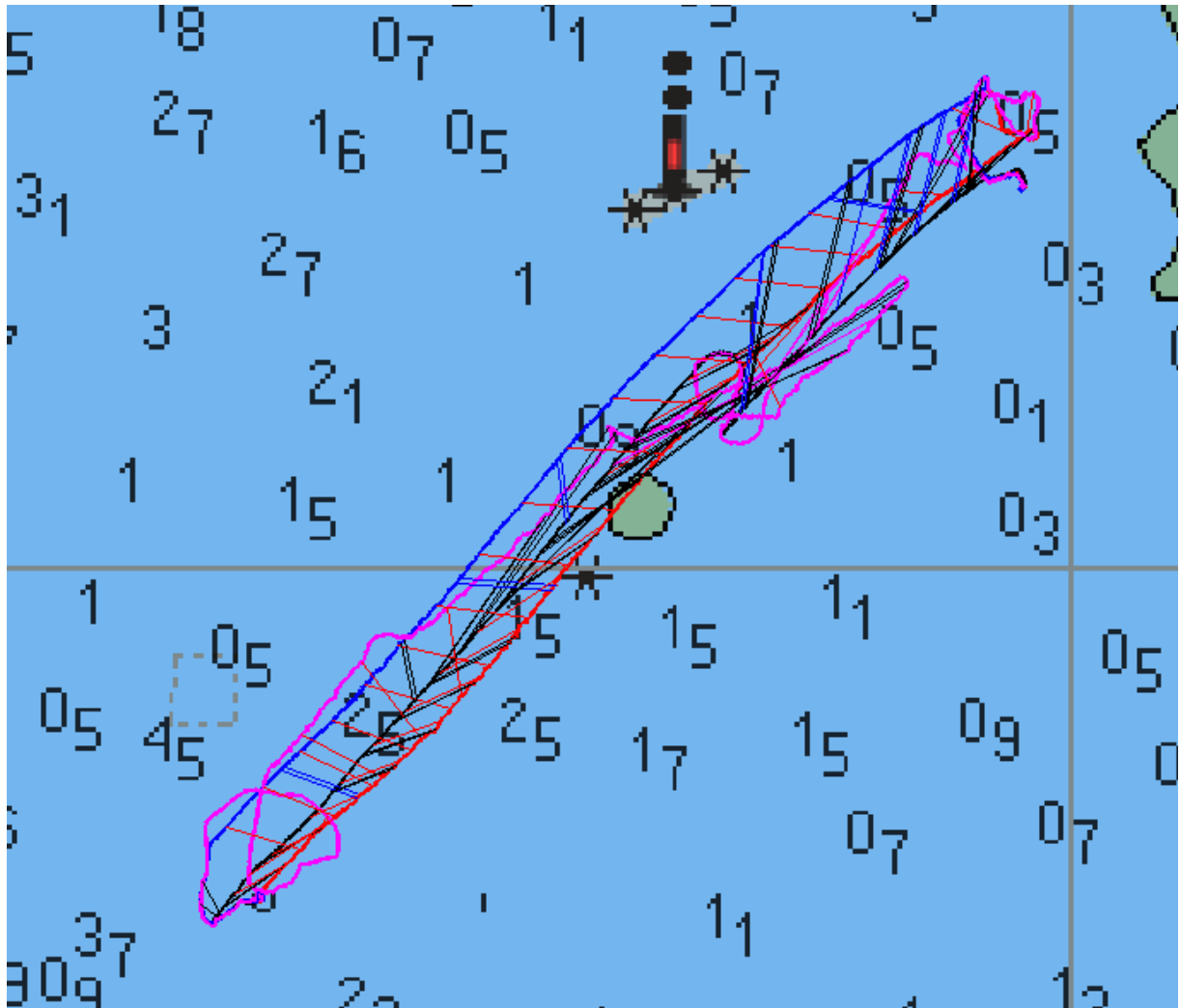


Figure 11 : Sur cette figure, les différentes mesures de distance faites par les modems sont représentées par un trait dessiné à la position d'émission correspondante (rouge, noir, bleu, violet selon la bouée émettrice).

Lors de cette expérience, nous avons pu mesurer des distances jusqu'à 600 m, avec une erreur d'environ 5 m, ce qui correspond à la précision de nos GPS. D'autres expériences seront probablement faites prochainement pour valider définitivement le système de communication, avant d'être mis en place sur nos AUVs. Ceci permettra de mettre en pratique les algorithmes développés par Aymeric BETHENCOURT, Vincent DREVELLE et Simon ROHOU, pour localiser efficacement une meute de robots sous-marins (voir e.g. [10]).

Différents travaux ont été aussi présentés lors de la conférence SWIM 2015 à Prague (voir [3], [4], [5], [6], [7], [8]). Certains pourront être proposés dans un numéro spécial de la revue *Reliable Computing*.

De plus, pour pouvoir facilement tester divers algorithmes sur des robots réels simples, et notamment en combinaison avec EASIBEX-MATLAB [3], certains capteurs et actionneurs courants sur nos robots ont été rendus facilement utilisables sous MATLAB (voir [9]). Ainsi, des étudiants ou chercheurs ayant peu de notions de programmation embarquée peuvent facilement découvrir le calcul par intervalles et l'appliquer tout de suite sur des robots à bas coût (e.g. un buggy téléguidé à 100€+smartphone sous Android à 100€+carte d'interface

IOIO à 50€ est suffisant pour réaliser des expériences intéressantes de SLAM dans différentes conditions). Ceci correspond à des besoins exprimés par d'autres chercheurs lors de la conférence SWIM et devrait être une bonne manière de diffuser les algorithmes et méthodes que nous développons actuellement.

Bibliographie

- [1] L. Jaulin, F. Le Bars, B. Clément, Y. Gallou, O. Ménage, O. Reynet, J. Sliwka and B. Zerr (2012). Suivi de route pour un robot voilier, CIFA 2012, pp 695-702.
- [2] F. Le Bars and L. Jaulin (2015). The World Robotic Sailing Championship, a competition to stimulate the development of autonomous sailboats, OCEANS 2015.
- [3] F. Le Bars, J. Nicola and L. Jaulin (2015). EASIBEX-MATLAB: a simple tool to begin with interval contractors, SWIM 2015.
- [4] C. Aubry and L. Jaulin (2015). Comparison of Kalman versus Interval based loop detection problem, SWIM 2015.
- [5] L. Jaulin, S. Rohou, J. Nicola, M. S. Ibn Seddik, F. Le Bars and B. Zerr; (2015). Distributed localization and control of a group of underwater robots using contractor programming, SWIM 2015.
- [6] M. S. Ibn Seddik, L. Jaulin and J. Grimsdale; (2015). Cooperative Localization And Formation Maintaining Using Range-only Measurements Without Communications, SWIM 2015.
- [7] S. Rohou, L. Jaulin, L. Mihaylova, F. Le Bars and S. Veres; (2015). Robot localization in an unknown but symmetric environment, SWIM 2015.
- [8] J. Nicola and L. Jaulin; (2015). Gaussian Nonlinear set inversion, SWIM 2015.
- [9] <https://github.com/ENSTABretagneRobotics/Hardware-MATLAB> and <https://github.com/ENSTABretagneRobotics/EASIBEX-MATLAB>
- [10] V. Drevelle, L. Jaulin, and B. Zerr. Guaranteed characterization of the explored space of a mobile robot by using subpavings. In Proc. Symp. Nonlinear Control Systems (NOLCOS'13), Toulouse, 2013.