

Convention de subvention DGA-DS/ENSTA Bretagne
n°2012.60.0010.00.470.75.01
Année 2013-2014- fourniture 3

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

F. Le Bars, V. Drevelle, S. Rohou, J. Nicola, M. S. Ibn Seddik, A. Béthencourt, 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, et la thèse de Simon ROHOU, qui vient de débiter. De plus, d'autres projets 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 réalisés cette année :

- Robotique marine de surface : participation à la WRSC/IRSC 2014 (compétition et conférence de robotique marine de surface autonome) en Irlande, collaboration avec l'Ifremer pour le robot voilier autonome VAIMOS (Voilier Autonome Instrumenté pour Mesures Océanographiques de Surface). Nous avons remporté la 2^{ème} place à ce concours (avec nos bateaux à moteurs).
- Robots sous-marins autonomes. Cette année, les concours SAUC-E et euRathlon étaient regroupés en Italie et tous les 2 sur de la robotique sous-marine. L'équipe constituée des AUVs (Autonomous Underwater Vehicles) SAUC'ISSE et SARDINE (+l'un des bateaux à moteur utilisé pour la WRSC) a notamment remporté la 1^{ère} place au concours SAUC-E (à égalité avec une équipe allemande) et la 2^{ème} équipe constituée des ROVs (Remote Operated Vehicles) de la société CISCREA modifiés a remporté la 2^{ème} place (à égalité avec une autre équipe allemande).
- Projets étudiants : projet de robot aéro-sous-marin, robots humanoïdes NAOs, Coupe de France de Robotique, robot vélo autonome, meute de robots terrestres autonomes...

Ces petits projets et concours sont de bons moyens pour initier les étudiants à la robotique.

- VIBes (A Visualization for Intervals and Boxes) : bibliothèque fournissant un moyen simple de dessin aux personnes travaillant avec les méthodes par intervalles, afin d'afficher leurs résultats (boîtes, sous-pavages, ...) sans devoir installer et apprendre à utiliser des bibliothèques de création d'interface utilisateur.

Déroulement de l'année

Comme tous les ans, plusieurs étudiants, stagiaires, doctorants et personnels sont impliqués dans les activités de robotique à l'ENSTA Bretagne. L'année a comme d'habitude commencé par une présentation des robots existants aux étudiants et des initiations aux éléments de base de nos robots les lundis et mardis soirs : programmation C sous Windows et Linux, traitement d'images de webcams, découverte d'OpenCV (bibliothèque de traitement d'images), utilisation d'Arduino pour la commande de servomoteurs, CAO (Conception Assistée par Ordinateur)... Des sujets de projets et de stages ont ensuite été proposés aux étudiants. Divers cours dans le cursus des étudiants sont aussi en lien avec la robotique et le calcul ensembliste.

Robotique marine : WRSC/IRSC 2014

La WRSC/IRSC 2014 (compétition et conférence de robotique marine de surface autonome) a eu lieu à Galway, Irlande du 8 au 12 Septembre 2014 (voir <http://wrsc2014.com/>). Les épreuves étaient similaires à celles de l'année dernière (que nous avons organisée à Brest). Nous y avons participé avec 2 bateaux à moteur cette fois-ci : celui construit en 2013 et un robot construit par des étudiants il y a quelques années, modifié et amélioré cette année pour notamment pouvoir communiquer avec nos robots sous-marins.

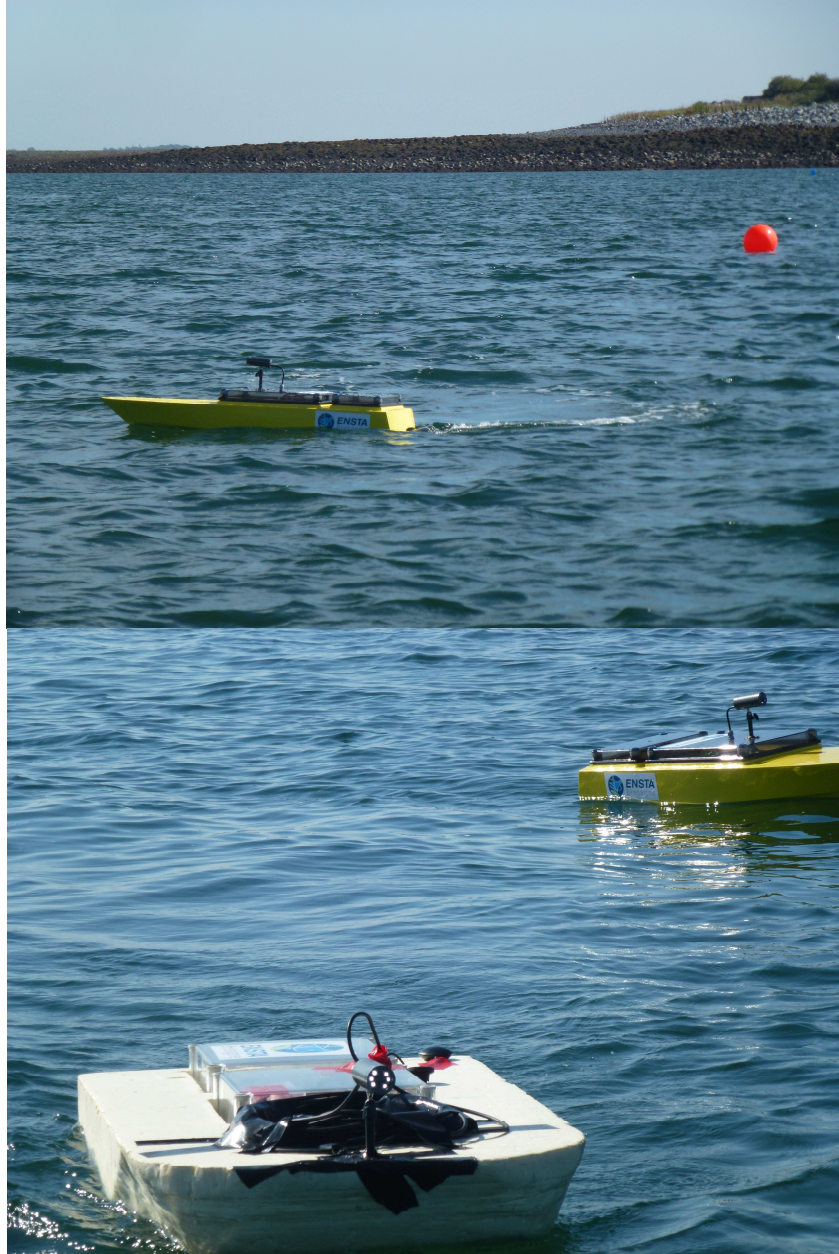


Figure 1 : Motorboat Yellow Avenger et hovercraft Optimousse.

Un stagiaire a développé un algorithme d'évitement d'obstacles par caméra, pour compléter celui réalisé et testé l'année dernière, qui nécessitait de connaître la position de l'obstacle. Nous l'avons utilisé lors de la dernière épreuve de la compétition. Ceci nous a permis d'obtenir la 2^{ème} place au concours (toutes catégories de bateaux à moteurs et voiliers confondues). L'équipe présente était constituée de Fabrice LE BARS (enseignant-chercheur), Théo BLANCHARD (étudiant 2A SPID en stage sur l'évitement d'obstacles), Antoine LAVIGNE (étudiant 2A SPID en stage sur la transmission vidéo et audio) et Benoit BOURDON (étudiant 2A SPID en stage sur l'amélioration d'un dispositif de tracking de position de robots en temps réel).

Par ailleurs, les travaux sur les voiliers continuent, nous avons présenté à IRSC des stratégies pour faire en sorte qu'un voilier puisse tracter efficacement une charge importante par rapport à son poids en utilisant intelligemment les courants marins et le vent [5]. Il reste aussi à intégrer au contrôleur développé pour le voilier VAIMOS les méthodes testées avec le

bateau à moteur pour éviter les obstacles (de positions connues par transmissions type AIS, ou détectés par caméra) en définissant des champs de potentiels.

Robotique sous-marine : cartographie d'une île, SAUC-E et euRathlon 2014

En juillet 2013, nous avons réalisé le tour de l'Île des Morts en rade de Brest avec un AUV de l'ENSTA Bretagne. L'AUV naviguait en autonomie par suivi de points GPS (à l'aide d'une bouée en surface). Cette expérimentation nous avait permis de tester un AUV en mer et d'accroître notre savoir faire expérimental. Au cours de cette expérimentation, nous avons recueilli un jeu de données GPS, sonar, vidéo... enregistrées à l'aide de l'intergiciel MOOS embarqué dans le robot.

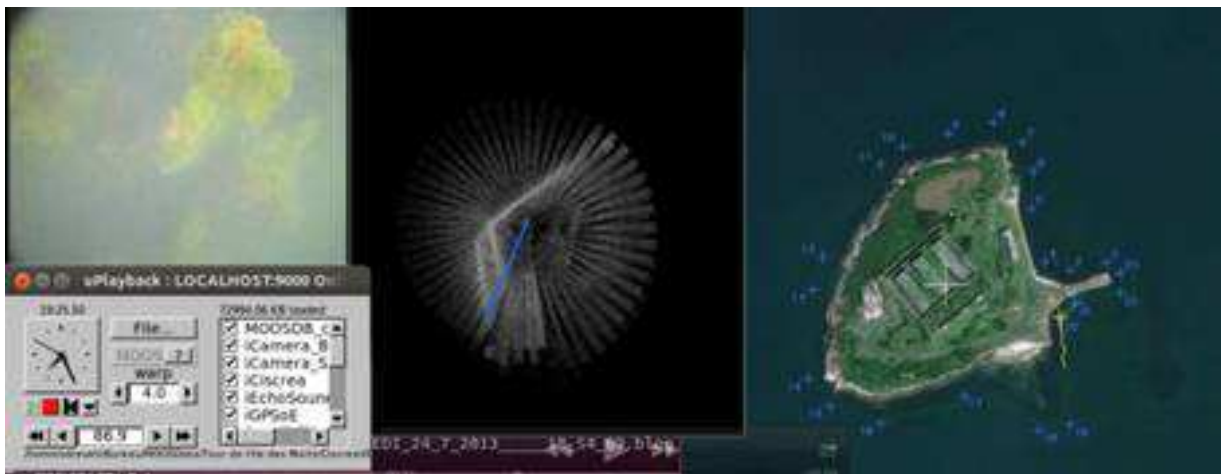


Figure 2 : Vues de la caméra fond, du sonar sectoriel et des waypoints suivis.

Le robot embarque notamment un sonar sectoriel Tritech Micron, fournissant une vue à 360 degrés autour du robot. Le traitement des données du sonar, couplées au GPS de la bouée de surface et la centrale inertielle bas coût du robot nous a permis de reconstruire une carte du fond autour de l'Île des Morts.

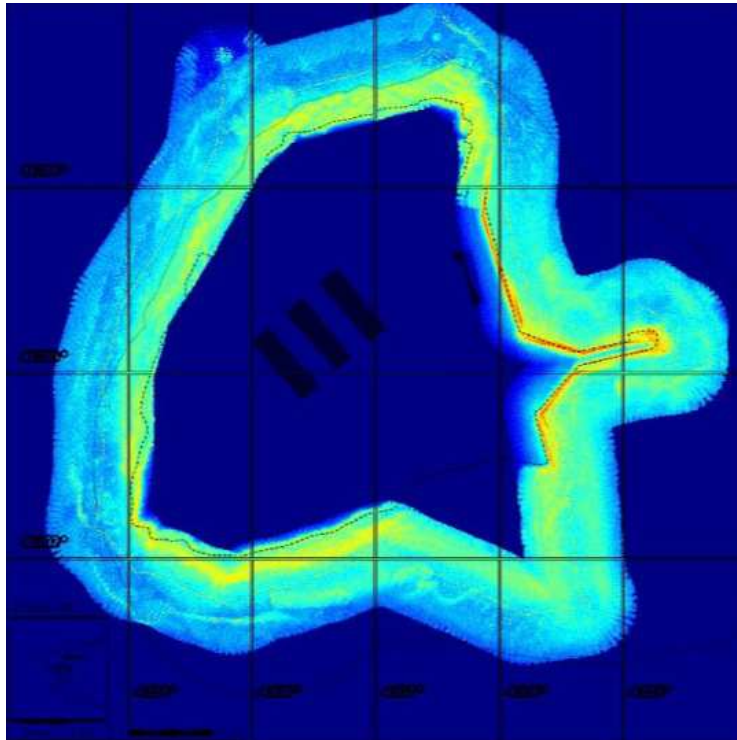


Figure 3 : Cartographie en 2D à partir des données sonar.

Après seuillage, le sonar peut être vu comme un capteur de distance directif, fournissant la distance au plus proche obstacle dans son volume d'émission. On peut alors formuler le calcul de l'espace libre comme un problème d'inversion ensembliste. La résolution de ce problème à l'aide d'une méthode ensembliste par intervalles permet de réaliser par « creusement » une carte 3D de l'espace libre autour de l'Île de Morts. Le complémentaire de cet espace libre donne une carte en 3D de l'île.

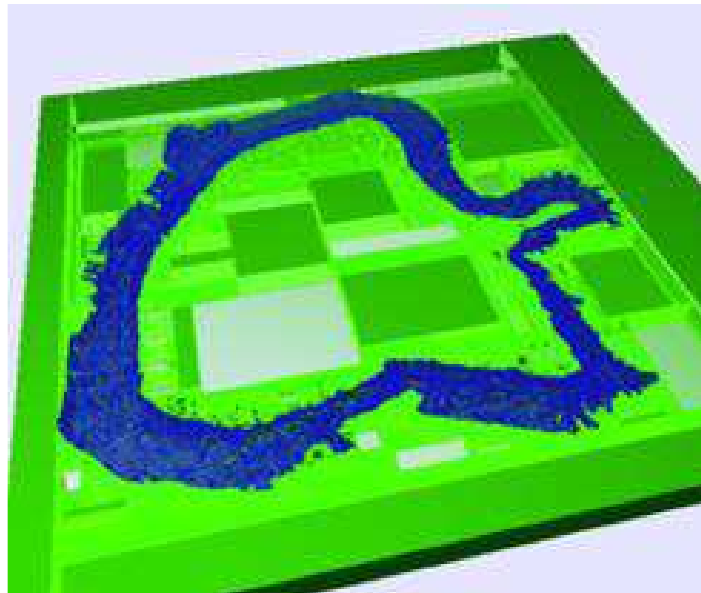


Figure 4 : Cartographie des berges en 3D par une méthode d'inversion ensembliste.

Nous travaillons aussi sur des améliorations de l'algorithme de localisation par calcul par intervalles d'un robot dans une piscine/port avec un sonar. L'idée est d'essayer d'étendre la q-intersection (voir [1]) et le principe des accumulateurs (voir [2]) déjà utilisés dans les

algorithmes précédents pour pouvoir mieux caractériser les éléments intéressants dans les données sonar malgré les données aberrantes (attribuer des scores aux échos selon leur cohérence avec ce qu'on attend comme type d'écho et d'autres types d'informations disponibles, pouvoir plus facilement définir un ensemble de positions restreint où il y a une accumulation de données cohérentes à l'intérieur de la zone où on garantit que le robot devrait être selon les hypothèses choisies...). Un parallèle avec les fonctions d'appartenances et alpha-cut, parfois utilisées pour gérer des incertitudes et données aberrantes dans le cadre des probabilités ou de la logique floue (voir [3] et [4]) sera effectué.

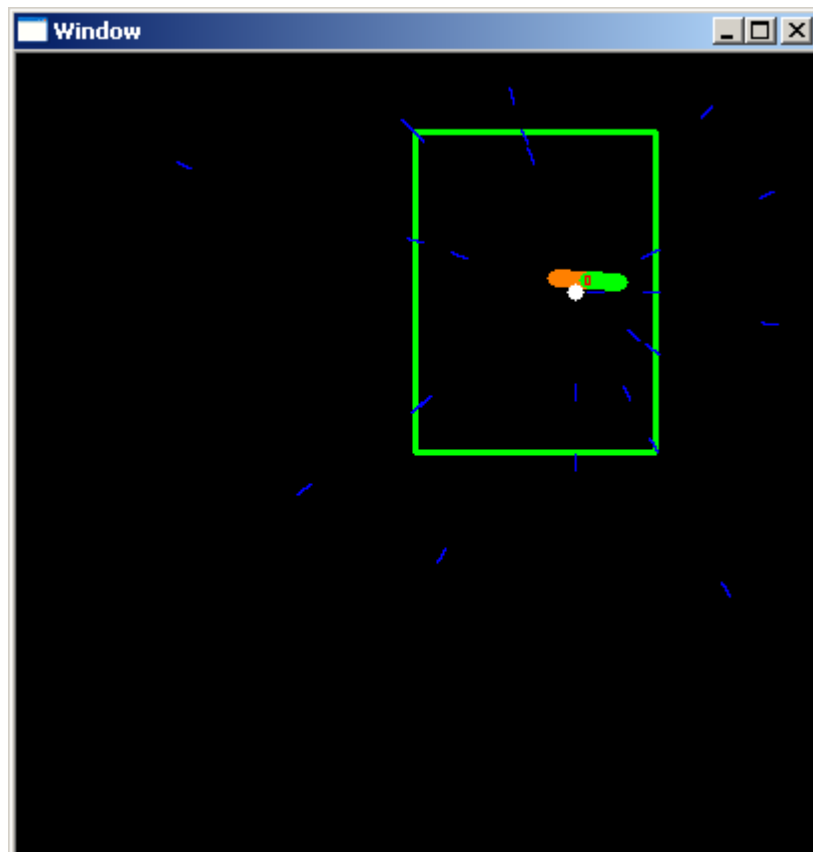


Figure 5 : Premiers tests en simulation du nouvel algorithme de localisation robuste par intervalles. Le point blanc représente la position réelle du robot dans la piscine verte et les traits bleus sont les echos sonar avec de très nombreuses données aberrantes (on voit que peu de ces traits sont cohérents avec les murs de la piscine). En connaissant les dimensions de la piscine et le cap du robot assez précisément, il est possible d'estimer assez précisément la position du robot avec de telles données sonar (la position estimée du robot est représentée par le robot vert et rouge). La position représentée est le centre du petit carré rouge, qui est la zone la plus cohérente avec les critères qu'on s'est donné (elle ne garantit rien), et qui se trouve à l'intérieur d'une zone plus grande (non représentée), où le calcul par intervalles nous garantit que le robot devrait être, compte tenu des hypothèses.

Des tests ont été faits en piscine et montrent de bons résultats, mais certaines idées d'amélioration n'ont pas encore été testées.

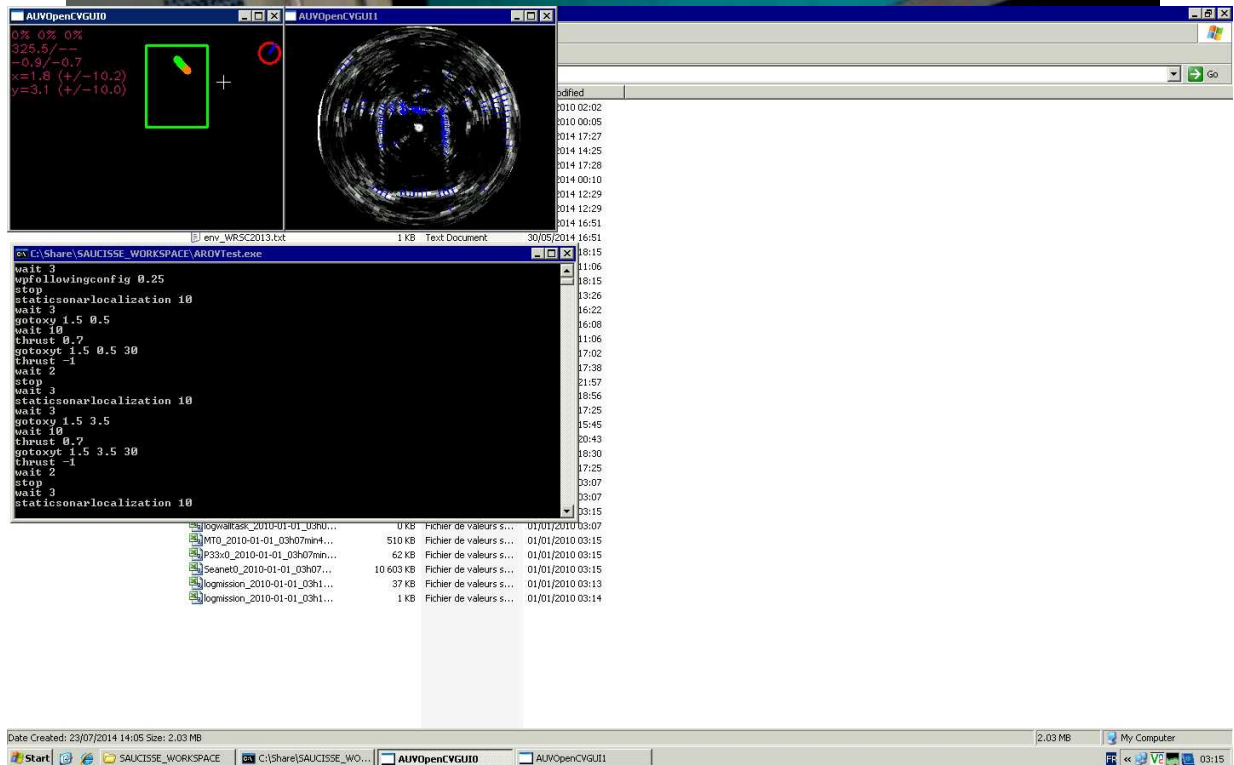


Figure 6 : Tests de localisation en piscine.

De plus, des tests en mer de localisation en alternant l'utilisation du GPS et le dead-reckoning (en préparation notamment des scénarios 1 et 5 d'euRathlon (longue distance et combiné avec suivi de mur)), et des tests avec nos modems acoustiques Trittech ont été faits. Lors du scénario 5 d'euRathlon, le robot sous-marin devait utiliser le GPS lorsqu'il fait surface, des mesures de distances régulières par modem acoustique avec un bateau en surface

qui a le GPS, la localisation par sonar lorsque le sous-marin arrive dans la zone du port connue, et le dead-reckoning (en utilisant des équations d'état, la boussole, et les consignes reçues par les propulseurs) quand aucune des autres méthodes ne peut donner d'informations.

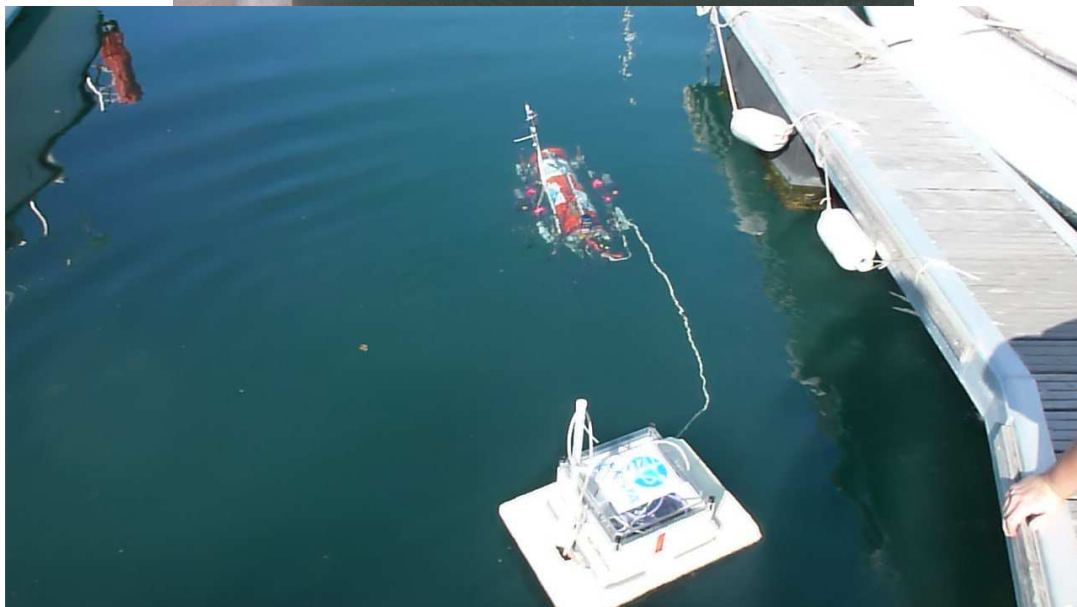
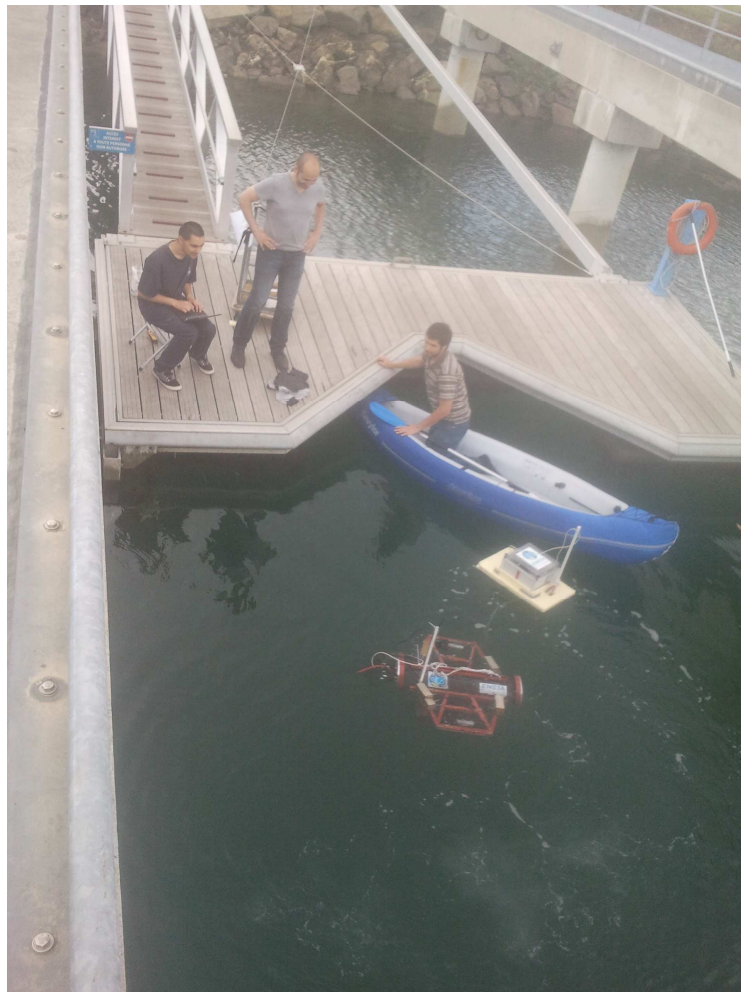


Figure 7 : Tests dans le port de Brest avec SARDINE et SAUCISSE.

Nous avons participé aux concours SAUC-E et euRathlon 2014, qui étaient regroupés à La Spezia, Italie du 20 Septembre au 3 Octobre 2014 et proposaient des épreuves proches du concours SAUC-E 2013 (voir <http://www.sauc-europe.org> et <http://www.eurathlon.org/>). Nous avons présenté 2 équipes:

- SAUC'ISSE et SARDINE : les 2 robots sous-marins les plus anciens (voir http://youtu.be/-0dmz_kx7AI). Chacun est maintenant équipé d'un GPS, sonar, modems acoustiques et hydrophones. De plus, l'hovercraft utilisé pendant la WRSC a été réutilisé pour certaines épreuves, pour améliorer les estimations de positions des robots sous-marins en communiquant par acoustique et mesurant leur distance relative.



Figure 8 : SAUC'ISSE et SARDINE.



Figure 9 : Equipe 1 SAUC'ISSE et SARDINE de l'ENSTA Bretagne pour SAUC-E et euRathlon 2014 : Elba Dolores ANTONIO YANEZ (doctorante au LAFMIA, CINVESTAV-IPN Mexico en stage à l'ENSTA Bretagne pendant 2 mois), Fabrice LE BARS (enseignant-chercheur Lab-STICC/CID/IHSEV, STIC/OSM, ENSTA Bretagne), Jésus Arturo MONROY ANIEVA (doctorant au LAFMIA, CINVESTAV-IPN Mexico en stage à l'ENSTA Bretagne pendant 2 mois).

- Le ROV CISCREA modifié l'année dernière pour pouvoir fonctionner en mode AUV.

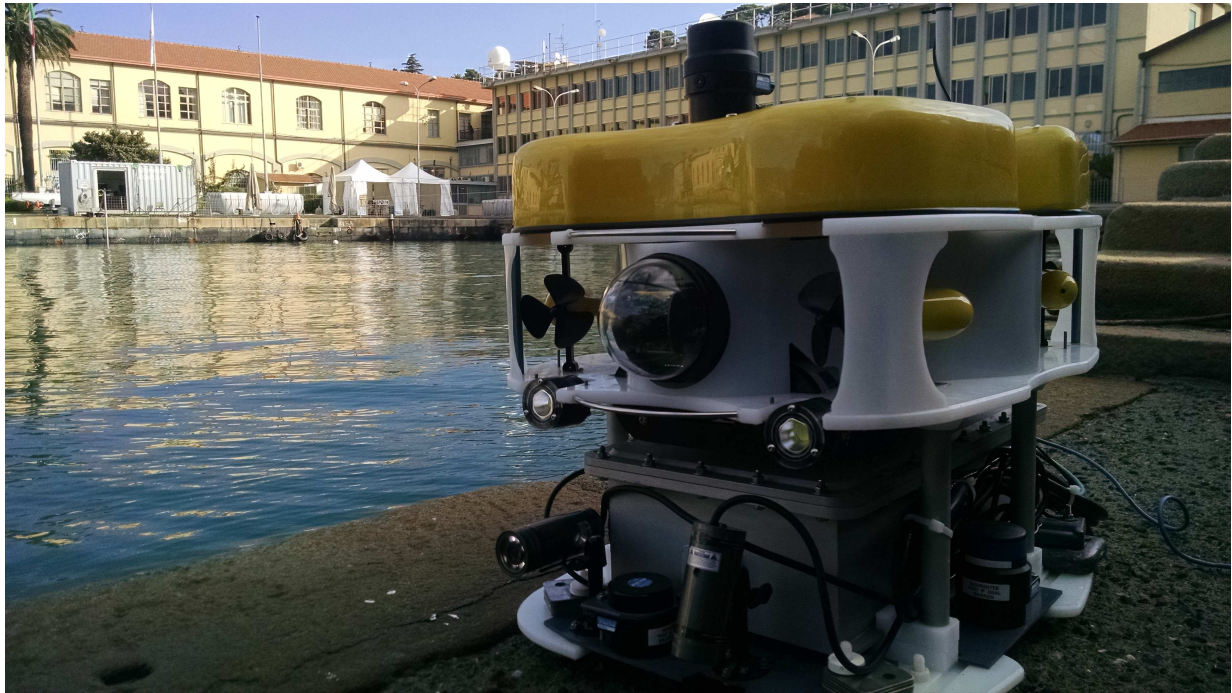


Figure 10 : Robot CISCREA modifié version 2014.



Figure 11 : Equipe 2 CISSAU de l'ENSTA Bretagne pour SAUC-E et euRathlon 2014 : Renata NEULAND (doctorante à l'UFRGS, Brésil en stage de 2 mois à l'ENSTA Bretagne), Rui YANG (doctorant en cotutelle ENSTA Bretagne-Ocean University of China), Mohamed Saad IBN SEDDIK (doctorant CGG-ENSTA Bretagne), Guilherme SCHVARCZ FRANCO (étudiant à l'UFRGS, Brésil), Simon ROHOU (doctorant DGA-DSTL ENSTA Bretagne).

Les épreuves de cette année étaient globalement les mêmes que pour SAUC-E 2013. Contrairement à l'année dernière, plusieurs équipes ont réussi plusieurs épreuves, ce qui montre que le niveau global des équipes s'améliore malgré la difficulté de certaines épreuves (utilisation d'une collaboration AUV-ASV pour certaines épreuves, détecter automatiquement des bouées de positions inconnues au fond de l'eau après un quadrillage de zone puis enchaîner avec un suivi de mur au sonar...).

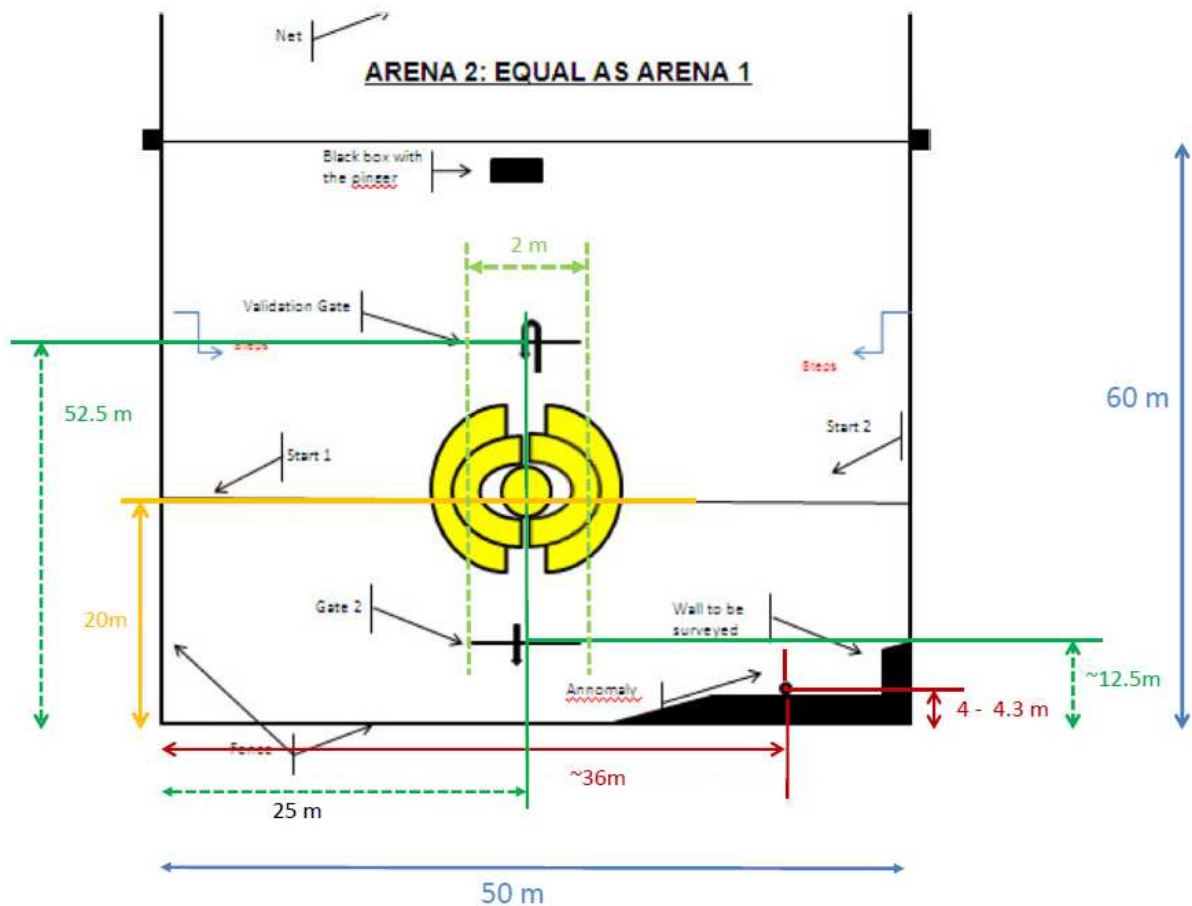


Figure 12 : Zone de la compétition SAUC-E 2014 (réutilisée aussi pour euRathlon 2014).

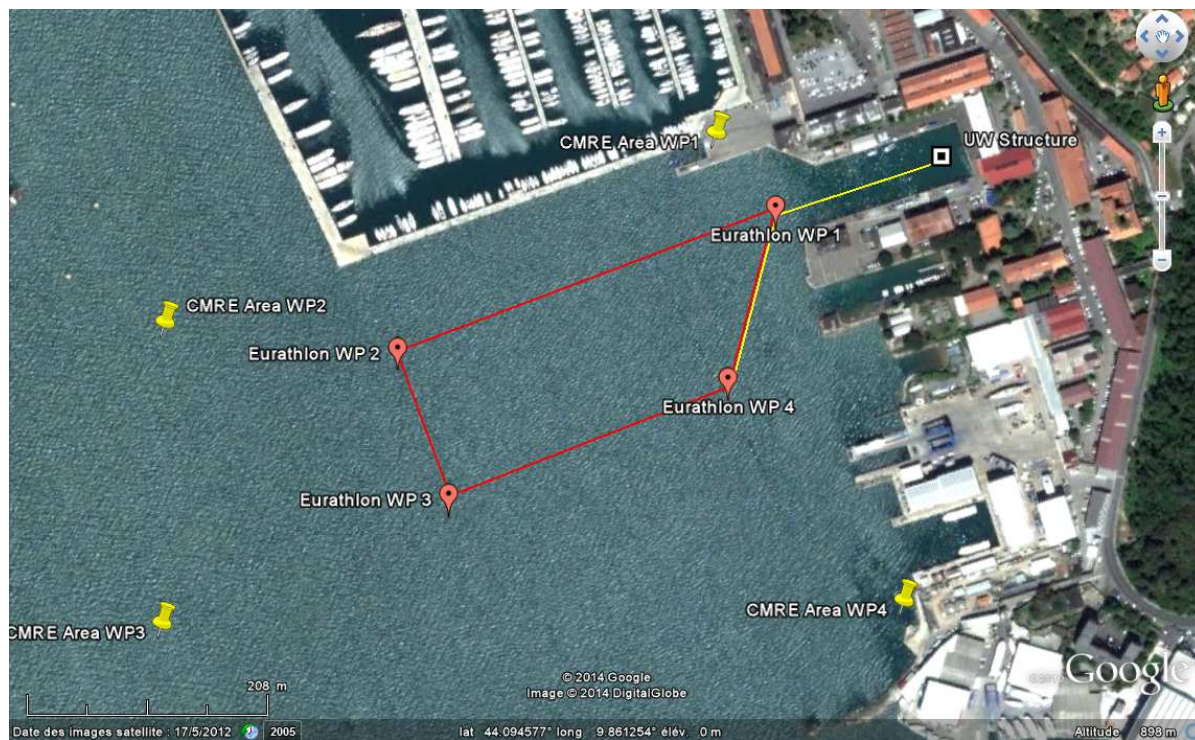


Figure 13 : Zone complète de la compétition euRathlon 2014.

L'équipe SAUC'ISSE et SARDINE a remporté la 1ère place du concours SAUC-E, à égalité avec l'équipe allemande Avalon. L'équipe CISSAU a remporté la 2ème place à égalité avec une autre équipe allemande, TomKyle.

Pour euRathlon, des prix étaient donnés pour chaque épreuve. L'équipe SAUC'ISSE et SARDINE a obtenu la 2ème place aux épreuves "Long range autonomous underwater navigation", "Environmental survey of the accident area", "Combined scenario" et la 3ème place à l'épreuve "Leak localisation and structure inspection". L'équipe CISSAU a obtenu la 3ème place pour l'épreuve "Interaction with an underwater structure".

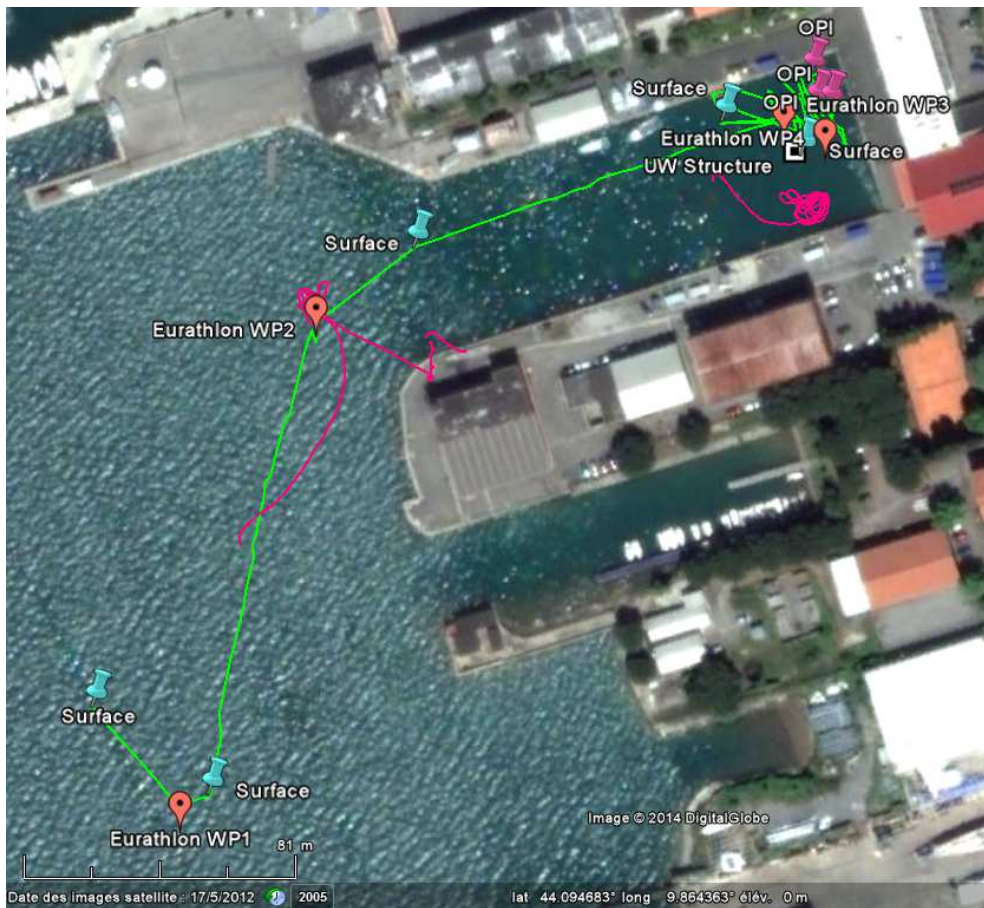


Figure 14 : Résultats de la dernière épreuve du concours euRathlon 2014 : le robot sous-marin SARDINE a été utilisé pour suivre des waypoints prédéfinis pour rejoindre la marina du CMRE, puis a quadrillé une partie de la zone et détecté des bouées au fond de cette zone, avant de suivre le coin de la marina et faire surface au dernier waypoint. Durant toute la mission, le robot sous-marin mesurait sa distance au robot de surface et recevait la position GPS de ce dernier. La trajectoire estimée par le sous-marin est en vert, avec en bleu les points où il a fait surface pour marquer un waypoint et récupérer une position GPS, la trajectoire du robot de surface est en rose (il est resté en station à 2 waypoints).

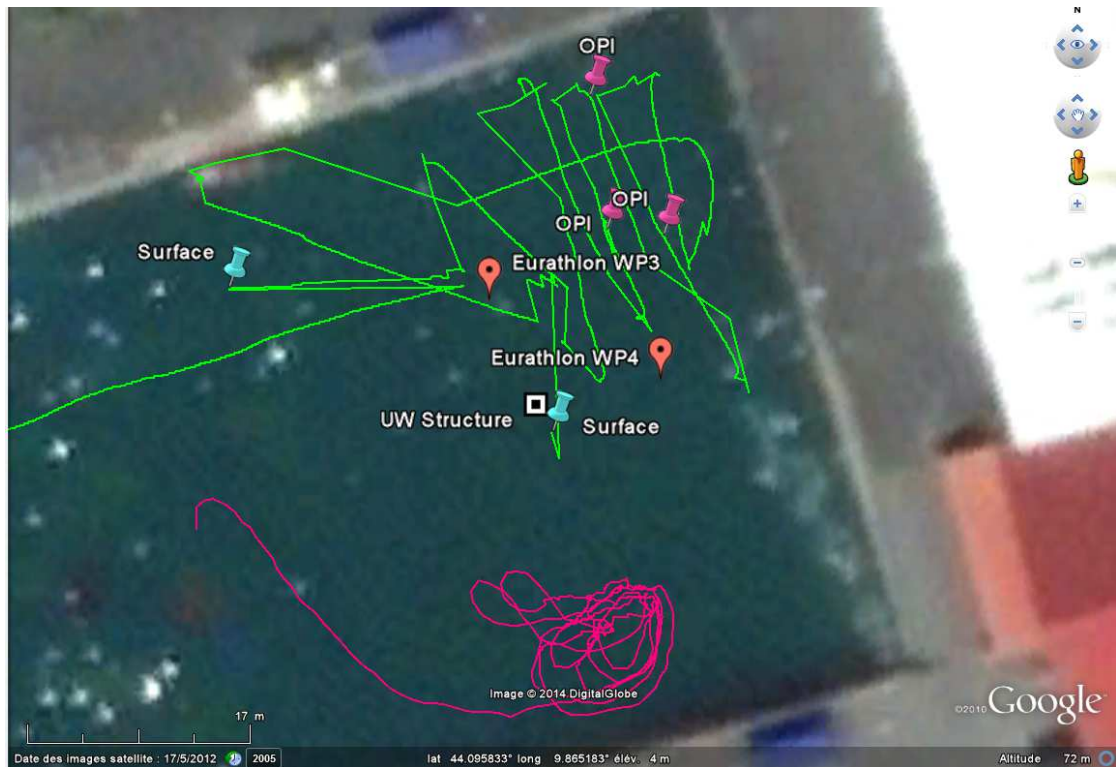


Figure 15 : Détails des résultats de la dernière épreuve du concours euRathlon 2014 : une fois rentré dans la marina, le sous-marin a quadrillé une zone et détecté 3 OPI (bouées oranges au fond), enchaîné avec un suivi du coin de la zone à 4 m du bord et fait surface au dernier waypoint. Pendant cette phase, le robot utilisait en plus son sonar pour se localiser par rapport aux bords.

En parallèle de cela, un stagiaire mexicain a travaillé pendant quelques mois sur un OpenROV, un petit robot sous-marin à très bas coût (1000€) sorti récemment. Ce type de petit robot peut être intéressant pour des tests de meutes de robots en piscine, pour leur bas coût, et leur petite taille.

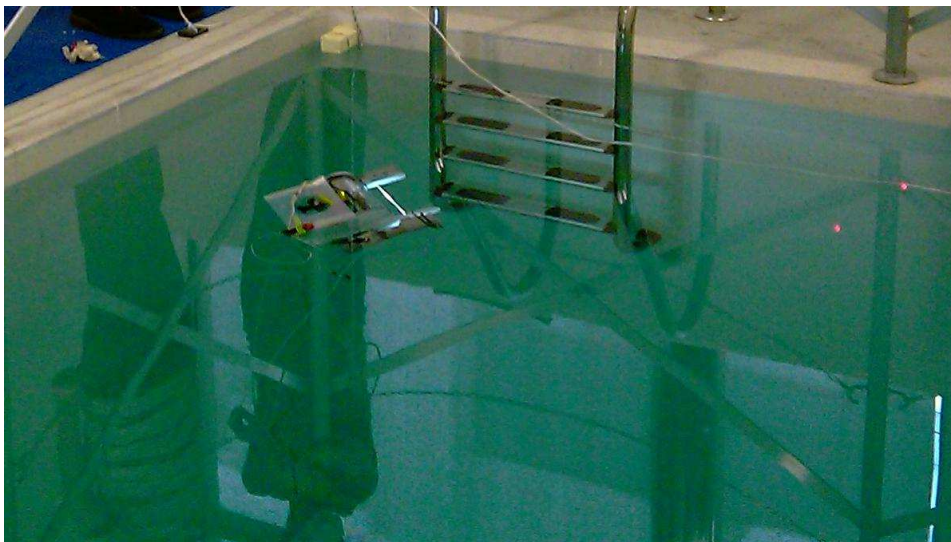


Figure 16 : Premiers tests de l'OpenROV dans la piscine de l'ENSTA Bretagne.

La thèse DGA de Simon ROHOU a démarré en Octobre sur de la cartographie sous-marine en utilisant une « stratégie pas-à-pas ». Au cours de cette thèse, des expériences pour valider les algorithmes développés devraient être faites avec une meute de 4 robots autonomes avec des capteurs suffisants. Comme les ROVs CISCREA que nous possédons ont montré

leurs limites au fil des dernières expériences, il est possible que nous devions réfléchir à la construction/utilisation d'autres robots, probablement plus proches des AUVs SAUC'ISSE et SARDINE.

Robotique aérienne : robot aéro-sous-marin

Différents récents ou futurs projets montrent qu'il est de plus en plus nécessaire d'être capable d'utiliser des robots de différents types pour effectuer des mesures ou explorations marines et sous-marines, pour pouvoir aborder de toutes les façons possibles l'environnement marin :

- Certains paramètres de la surface de l'océan peuvent être efficacement mesurés à coût réduit en survolant une zone (pour ajouter plus de précision aux données prises par satellites tout en limitant les coûts en évitant de mobiliser un navire océanographique par exemple).
- Lorsqu'on recherche un objet perdu dans l'eau dans une zone de plus en plus incertaine à mesure que le temps passe, la manière la plus rapide de l'atteindre devrait être de rejoindre la zone par les airs puis plonger dans l'eau une fois arrivé sur zone.

Ces considérations nous ont conduits à réfléchir à un robot capable de voler, puis de plonger et redécoller depuis l'eau. Un stagiaire de l'ENSICA a travaillé en projet de fin d'études à l'ENSTA Bretagne sur l'automatisation des avions. Des mini-avions à très bas coûts ont été construits pour se former à la robotique aérienne.



Figure 17 : Premiers tests avec un avion téléguidé construit en 2 jours à l'école avec l'aide de Rogelio LOZANO Jr, invité à l'ENSTA Bretagne.

Des mesures de roulis, tangage, lacet, GPS ont aussi été effectuées sur un avion de l'aérodrome de Brest, pour comparer différents capteurs et avoir une meilleure idée de la dynamique d'un petit avion.

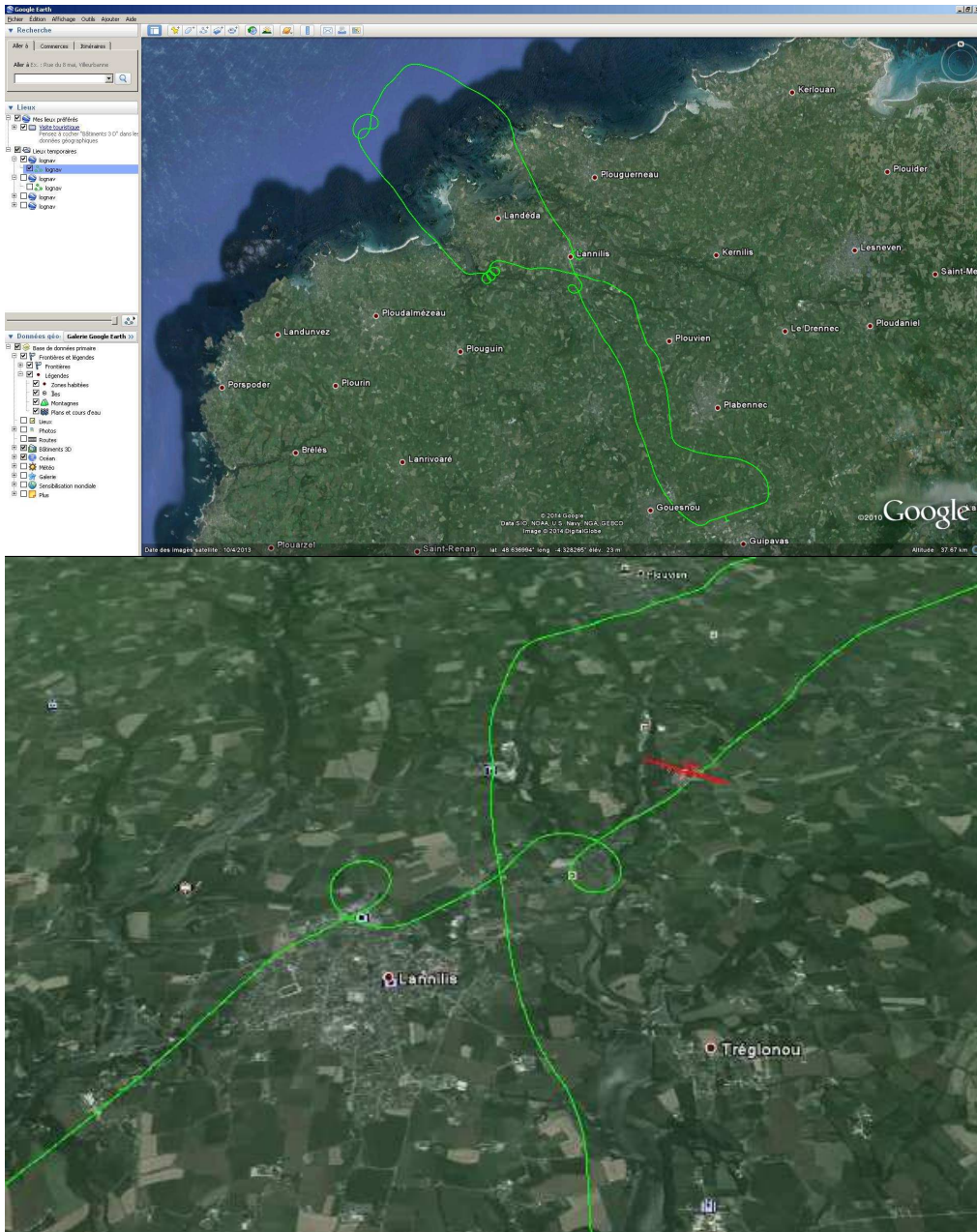


Figure 18 : Trajectoire et avion utilisé pour évaluer les capteurs. Nous avons pu constater que certains capteurs pouvaient donner des résultats irréalistes dans certaines situations, notamment dans les boucles.

A la suite de cela, un robot avion autonome a été réalisé et testé par le stagiaire. Le robot a réussi à faire un suivi de trajectoire GPS en autonome. Des projets étudiants prenant la suite de ces travaux viennent de débiter en Octobre.



Figure 19 : Tests de l'avion autonome.

VIBes: A Visualization for Intervals and Boxes

Nous développons actuellement le logiciel de visualisation VIBes, dédié aux besoins des personnes travaillant avec les méthodes ensemblistes par intervalles, en particulier les roboticiens. Ce projet Open Source est hébergé par GitHub. Le site du projet est accessible à l'adresse <http://enstabretagnerobotics.github.io/VIBES/>

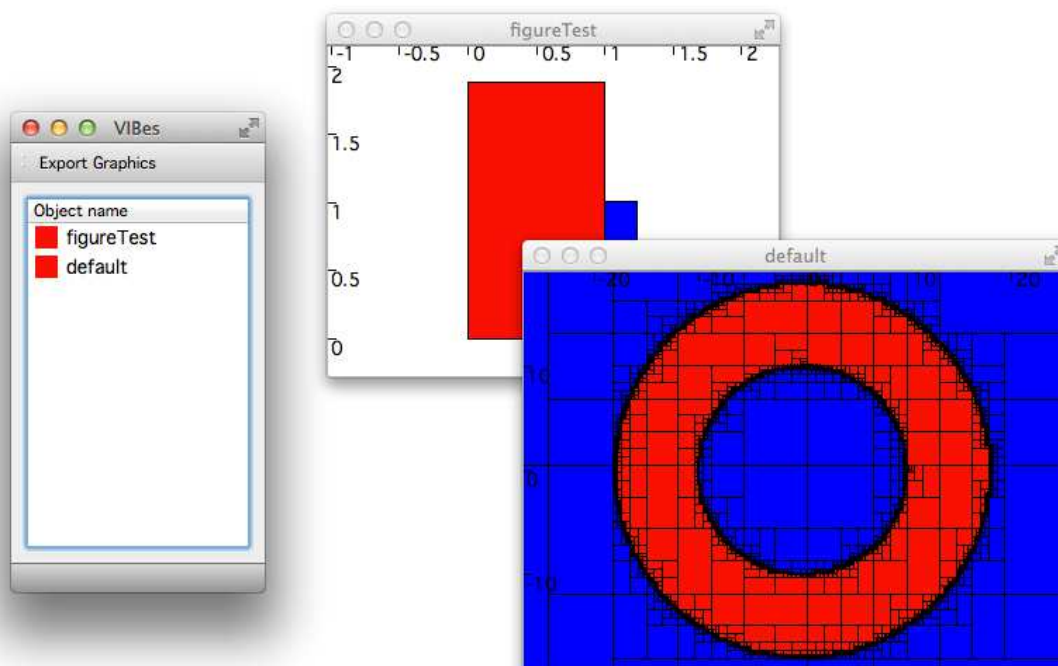


Figure 20 : Vue de l'application VIBes, avec l'affichage du résultat d'une inversion ensembliste.

VIBes a pour but de fournir un moyen simple de dessin aux personnes travaillant avec les méthodes par intervalles, afin d'afficher leurs résultats (boîtes, sous-pavages, ...) sans devoir installer et apprendre à utiliser des bibliothèques de création d'interface utilisateur. VIBes fournit des fonctions de dessin accessibles à partir de plusieurs langages de programmation, sans installation complexe ni problèmes de dépendance avec des bibliothèques logicielles. VIBes est avant tout pensé pour être multi-plateformes, disponible depuis de nombreux langages, simple à mettre en œuvre et facile à porter dans un langage non supporté.

VIBes se décompose en deux parties, communiquant par le biais de fichier ou de *pipe* nommé :

- L'application VIBes, qui permet d'afficher des figures, d'y naviguer, de les annoter et de les exporter.
- L'interface de programmation (API) VIBes, qui permet à un programme de communiquer avec VIBes pour dessiner des figures (disponible en C++, et prochainement Matlab et Python...)

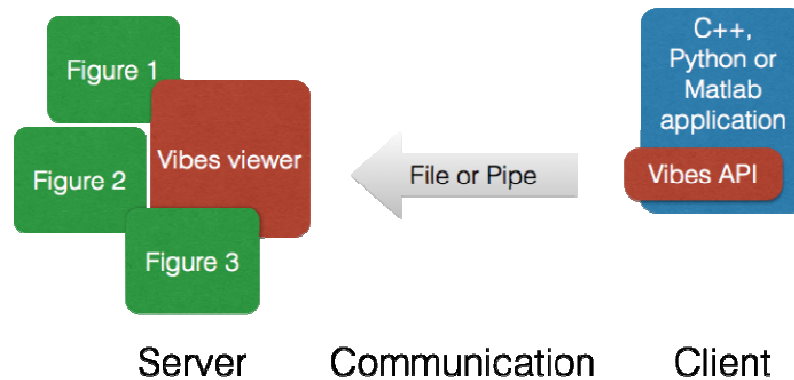


Figure 21 : Architecture de VIBes.

Actuellement, VIBes permet de dessiner des boîtes, des unions de boîtes, des ellipses et ellipses de confiance, ainsi que des courbes. Les objets peuvent être définis dans un espace à N-dimensions, et l'utilisateur choisit les deux dimensions sur lesquelles projeter pour l'affichage 2D. La projection peut être changée à partir de la fenêtre d'affichage. Des groupes permettent de réunir des objets devant partager certaines propriétés (par exemple la couleur), ou d'unir des objets qui pourront ensuite être déplacés simultanément.

L'utilisation d'une application séparée pour l'affichage permet une installation très simple sur chaque système. D'un côté, l'application VIBes est disponible sous forme de binaires déjà compilés pour les plateformes courantes (Windows, Mac, Linux). De l'autre, l'API consiste seulement en quelques fichiers à ajouter dans le programme (par exemple, seulement un fichier .h et un fichier .cpp pour l'API C++).

Bibliographie

- [1] L. Jaulin. Robust set membership state estimation ; application to underwater robotics. Automatica, 45(1) :202-206, 2009.

- [2] J. Sliwka. Using set-membership methods for robust underwater robot localization. Thèse UBO, 2011.
- [3] D. Dubois and H. Prade. Fussy Sets and Systems-Theory and Applications. Academic Press, New York, NY, 1980.
- [4] J. Sliwka, L. Jaulin, M. Ceberio, and V. Kreinovich. Processing interval sensor data in the presence of outliers, with potential applications to localizing underwater robots. In IEEE SMC, Anchorage, Alaska, 2011.
- [5] L. Jaulin and F. Le Bars. Towing with sailboat robots. IRSC, Galway, Ireland, 2014.