

**Convention de subvention DGA-DS/ENSTA Bretagne**  
**n°2012.60.0010.00.470.75.01**  
**Année 2014-2015 - fourniture 3**

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

F. Le Bars, C. Aubry, S. Rohou, T. Le Mezo, 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), et 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 ont débuté en Septembre-Octobre 2014, le post-doc de Clément AUBRY en 2015 et la thèse de Thomas LE MEZO commencée en Octobre 2015.

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 réalisés cette année :

- euRathlon 2015 ([www.eurathlon.eu](http://www.eurathlon.eu)). Comme l'année dernière, les concours SAUC-E et euRathlon ont été regroupés en Italie. La nouveauté cette année était que les épreuves nécessitaient des robots sous-marins, marins, terrestres et aériens, autonomes ou téléopérés. L'idée était 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 avons participé avec nos AUVs (Autonomous Underwater Vehicles) SAUC'ISSE et SARDINE, nos robots de surface à moteur, notre ancien robot terrestre construit pour le concours ETAS (et déjà réutilisé pour euRathlon 2013), ainsi que de nouveaux robots terrestres et aériens construits par des étudiants. Des 1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> places ont été remportées à diverses épreuves.
- WRSC/IRSC 2015 (compétition et conférence de robotique marine de surface autonome) aux Aland Islands, Finlande : un ancien voilier téléguidé de 1.5 m prêté par

un ingénieur de l'Ifremer a été automatisé avec des adaptations des algorithmes mis au point sur le voilier VAIMOS de l'Ifremer. Nous avons été 1<sup>ers</sup> à 2 épreuves sur 4 et 2<sup>ème</sup> au classement général, derrière un voilier de 4 m.

- Localisation, communication et cartographie avec des meutes de robots sous-marins : différents types de nouveaux robots sous-marins sont actuellement en construction, des tests de communication avec des modems acoustiques à bas coût ont été effectués pour voir comment ils pourraient être utilisés dans ces futures meutes de robots, et des expériences en mer avec RTsys et le GESMA ont été réalisées.
- Démonstration d'un bateau à moteur pour le Forum DGA Innovation.
- EASIBEX, pyIbex et IAMOOC : 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++, programmation orientée objet...) d'utiliser les possibilités d'IBEX ([www.ibex-lib.org](http://www.ibex-lib.org)) à travers des fonctions très simples en MATLAB ou C++. De plus, pyIbex, une interface en Python pour IBEX a aussi été mise au point (<https://github.com/benEnsta/pyIbex>). Dans la même logique de ces outils, IAMOOC, un MOOC pour apprendre à utiliser le calcul par intervalles sur des exemples simples a été lancé : <http://iamooc.ensta-bretagne.fr/>.
- 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.

## Déroulement de l'année

Comme tous les ans, plusieurs étudiants, stagiaires, doctorants et personnels ont été 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 : 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), impression 3D, pilotage et assemblage de drones... 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. L'implication des étudiants dans les projets de recherche est une composante essentielle à la réalisation de démonstrations de robots convaincantes, ainsi que la formation de futurs ingénieurs, doctorants, enseignants-chercheurs autour de la robotique et du calcul ensembliste.

## euRathlon 2015

Nous avons participé aux concours euRathlon 2015 et SAUC-E 2015, regroupés à Piombino, Italie du 17 au 25 Septembre 2015. Cette édition du concours euRathlon proposait des épreuves impliquant de la robotique sous-marine, marine, terrestre et aérienne. La partie sous-marine comportait un classement supplémentaire réservé aux équipes étudiantes et constituait le concours SAUC-E 2015, les équipes non-étudiantes étant sur un classement distinct comptant pour euRathlon (voir [www.eurathlon.eu](http://www.eurathlon.eu)). Le scénario de cette année

simulait 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 étaient 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.

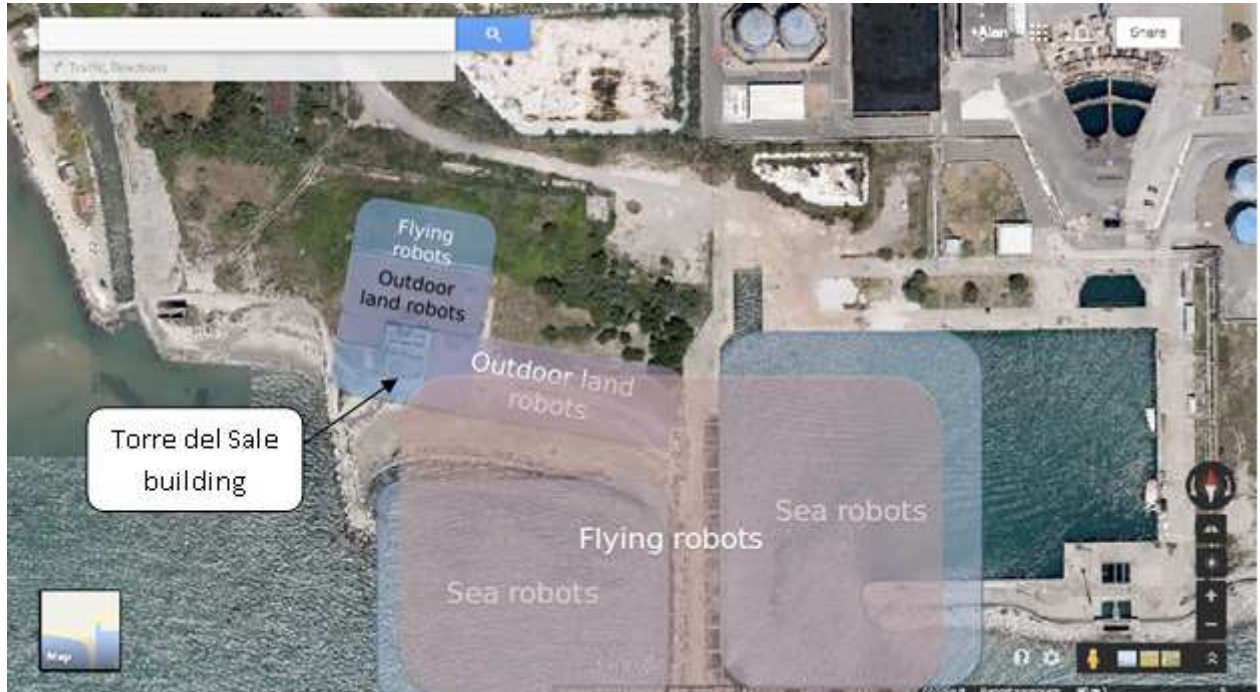


Figure 1 : Zone de la compétition euRathlon 2015.

Pour les épreuves marines et sous-marines, nous avons utilisé nos 2 robots sous-marins les plus anciens, gagnants de SAUC-E 2014 : SAUC'ISSE et SARDINE.



Figure 2 : SAUC'ISSE et SARDINE.

Ils étaient assistés par notre robot de surface bateau à moteur (présenté en démonstration lors du Forum Innovation DGA 2015) mis à jour avec un nouveau système de propulsion et notre hovercraft utilisé aussi l'année dernière. Ils servaient 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.

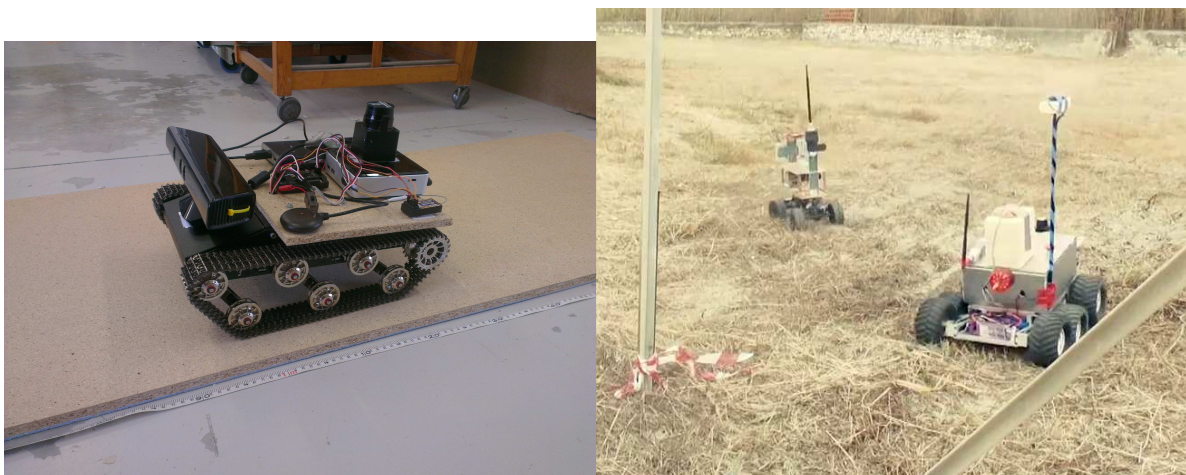




**Figure 3 : Bateau à moteur autonome utilisé à euRathlon 2015 et au Forum Innovation DGA 2015, et hovercraft.**

Pour la partie terrestre, plusieurs robots différents ont été mis au point :

- Un petit robot à chenille basé sur plateforme mécanique commerciale à bas coût. Il servait de robot principal pour l'exploration du bâtiment inconnu et était équipé d'un Ardupilot, un PC, un télémètre laser rotatif Hokuyo et une Kinect. Bien qu'il ait été principalement téléopéré pendant la compétition, il était capable d'effectuer quelques missions autonomes simples (notamment suivi de points GPS en extérieur).
- Le robot à 6 roues construit à l'origine pour le concours ETAS 2004 et réutilisé pour euRathlon 2013 aussi été utilisé. Des réparations et améliorations ont été effectuées pour le remettre à jour et en état. Ses capteurs étaient très similaires à l'autre robot principal d'exploration.
- Un buggy, servant de relais de communication Wi-Fi. Sa base mécanique vient d'un véhicule téléguidé de moins de 50 cm de long et son architecture électronique était basée sur un smartphone sous Android. Il était 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.



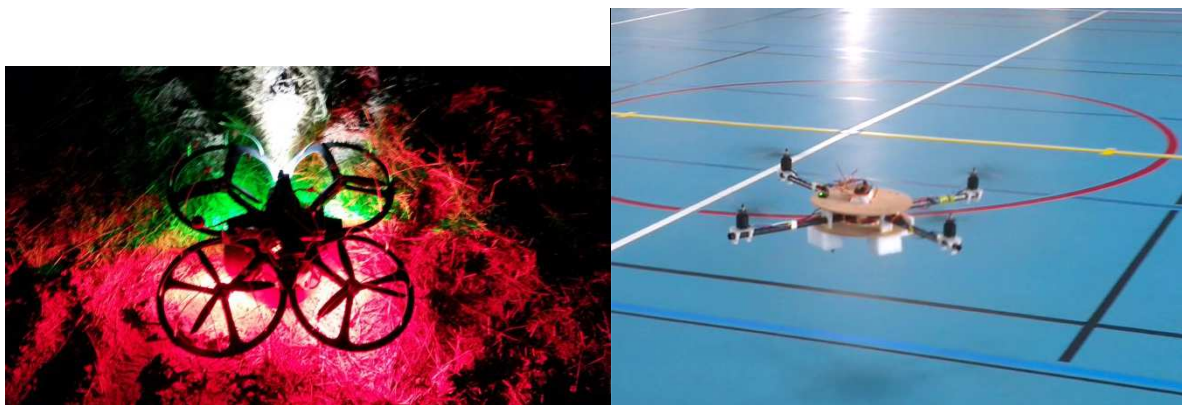
**Figure 4 : Robots terrestres utilisés pour l'exploration d'un bâtiment et buggy servant de relais de communication.**

2 différents quadrirotors ont été construits par des étudiants 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 gérait 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 étaient directement transférées par Wi-Fi vers un robot roulant ou la station de contrôle et peu de traitement de données était possible à bord. Les fonctions d'autonomie de l'autopilote étaient principalement utilisées comme aide au pilotage à distance, et les autres données de trajectoire et cartographie étaient principalement traitées offline.

- Un quadrirotor d'extérieur. Celui-ci était 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 étaient 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 pouvaient aussi être embarqués pour essayer de détecter automatiquement les OPIs.



**Figure 5 : Quadrirotor d'intérieur et quadrirotor d'extérieur.**

D'autres drones ont aussi été construits dans l'année pour différents tests, et un drone Parrot Bebop a aussi été utilisé pendant la compétition.

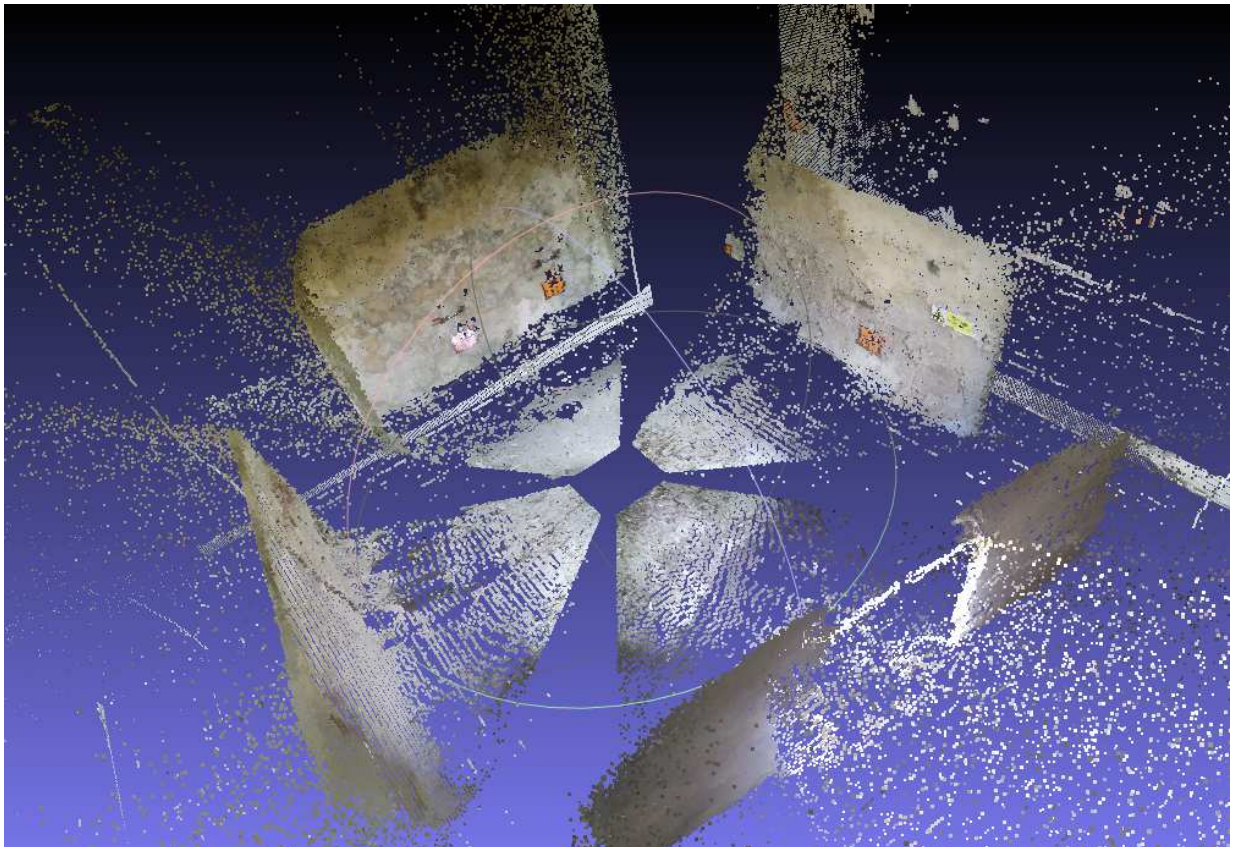


**Figure 6 : Quadrirotors construits par les étudiants en préparation d'euRathlon 2015.**

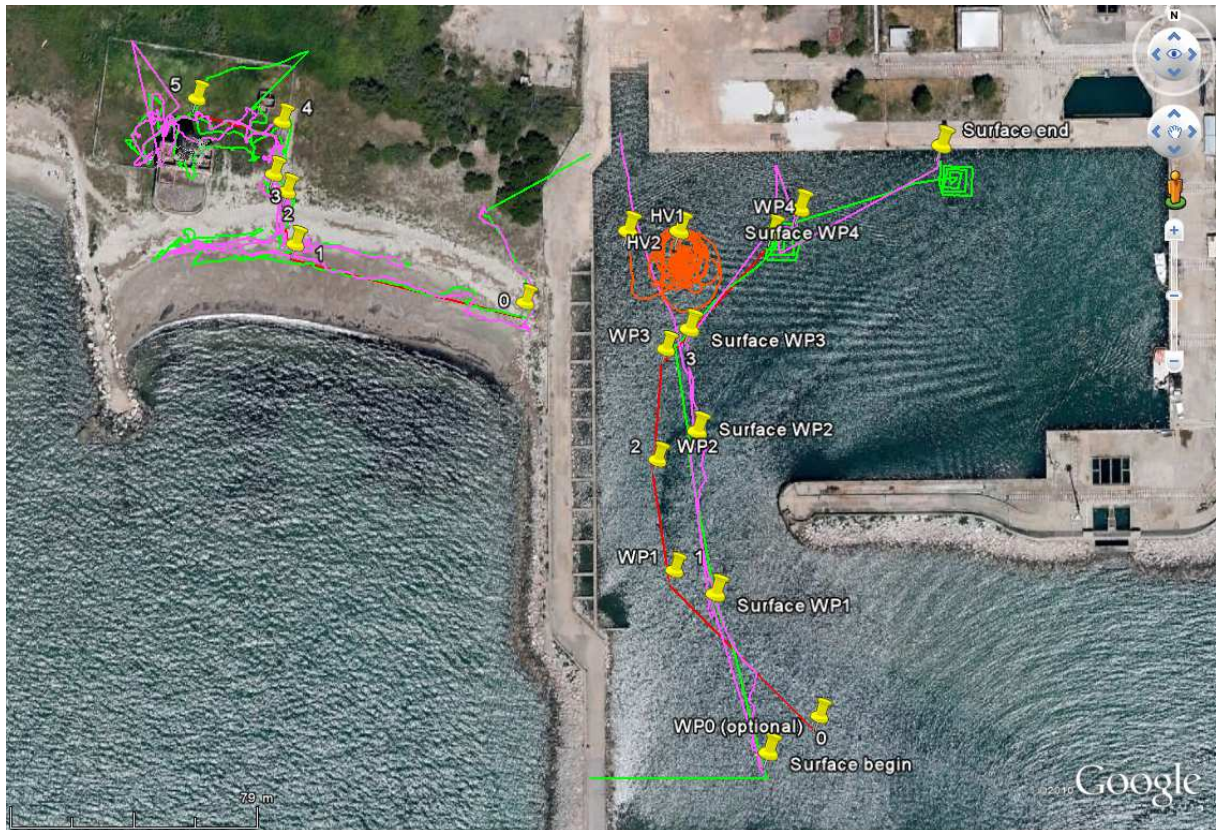
Des cartes 2D des zones à explorer devaient être fournies par sonar pour les parties marines et par laser ou caméra sur terre ou dans les airs. Les informations d'altitude à l'extérieur du bâtiment par robots aérien permettaient de fournir des cartes 2.5D avec



information de relief des alentours du bâtiment et la Kinect des robots terrestres donnait en plus une cartographie 3D à l'intérieur (ccny\_rgbd\_tools ROS package). Les OPI (Object of Potential Interest) ont été 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 a été 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 7 : Reconstruction 3D avec une Kinect d'une des salles du bâtiment à explorer.**



**Figure 8 : Trajectoires des différents robots utilisés pour la dernière épreuve d'euRathlon.**

Nous avons remporté des 2<sup>èmes</sup> places sur une douzaine d'équipes dans les épreuves sous-marines. En particulier, nous sommes 2<sup>èmes</sup> sur le classement étudiant SAUC-E. De plus, nous avons obtenu des 1<sup>ère</sup> et 3<sup>ème</sup> places sur les épreuves d'exploration d'intérieur par quadrirotors, entièrement réalisés et utilisés par des étudiants.

## WRSC/IRSC 2015

La WRSC/IRSC 2015 (compétition et conférence de robotique marine de surface autonome) a eu lieu aux Aland Islands, Finlande du 31 Août au 4 Septembre 2015 (voir [www.wrsc2015.com](http://www.wrsc2015.com)). Les épreuves étaient similaires à celles des années précédentes, avec quelques restrictions (e.g. il n'y avait pas de catégorie pour les bateaux à moteur). Les algorithmes utilisés pour le voilier autonome VAIMOS [1] ont été adaptés sur un voilier plus petit muni de capteurs à plus bas coût (notamment le capteur de vent). Nous avons été 1<sup>ers</sup> sur 2 épreuves et 2<sup>ème</sup> au classement général.





**Figure 9 : Voilier utilisé pour la WRSC 2015.**

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.

## **Localisation, communication et cartographie avec des meutes de robots sous-marins**

En lien avec le concours euRathlon et les travaux de thèse de Simon ROHOU, 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.

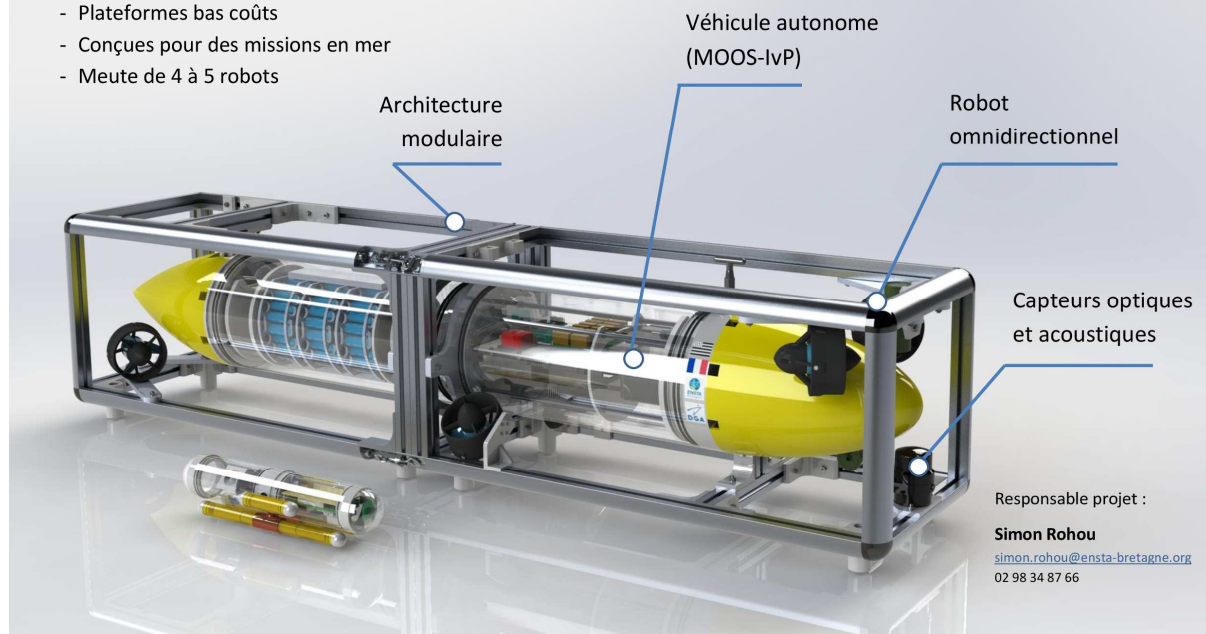


# AUV Toutatis

Team of Organized Underwater robots  
for Autonomous Tasks of Inspection and Survey



- Plateformes bas coûts
- Conçues pour des missions en mer
- Meute de 4 à 5 robots



**Figure 10 : Modélisation 3D de TOUTATIS, nouveau robot sous-marin en construction.**

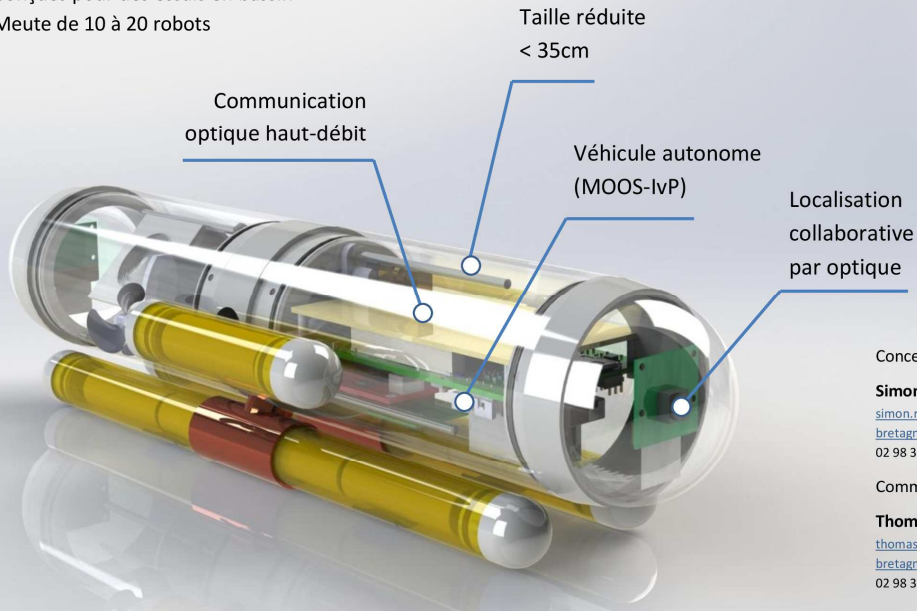
Ce nouveau type de robot pourra être contrôlé sur ses 6 degrés de liberté, sera modulaire en pouvant être séparé en 2 au milieu pour remplacer une de ses moitiés (e.g. remplacer la moitié contenant les batteries par une autre moitié plus petite sans batterie pour fonctionner en mode ROV, ou rajouter 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.

En plus de cette meute de robots adaptée pour les expériences en mer, d'autres robots adaptés aux tests en piscine sont aussi en construction. Leur principale nouveauté est qu'ils seront dotés d'une communication optique.

# AUV Optique



- Plateformes très bas coût
- Conçues pour des essais en bassin
- Meute de 10 à 20 robots



Conception robot :

**Simon Rohou**  
[simon.rohou@ensta-bretagne.org](mailto:simon.rohou@ensta-bretagne.org)  
02 98 34 87 66

Communication optique :

**Thomas Le Mézo**  
[thomas.le\\_mezo@ensta-bretagne.org](mailto:thomas.le_mezo@ensta-bretagne.org)  
02 98 34 89 02

Figure 11 : Modélisation 3D des mini-AUVs pour communication optique en piscine.

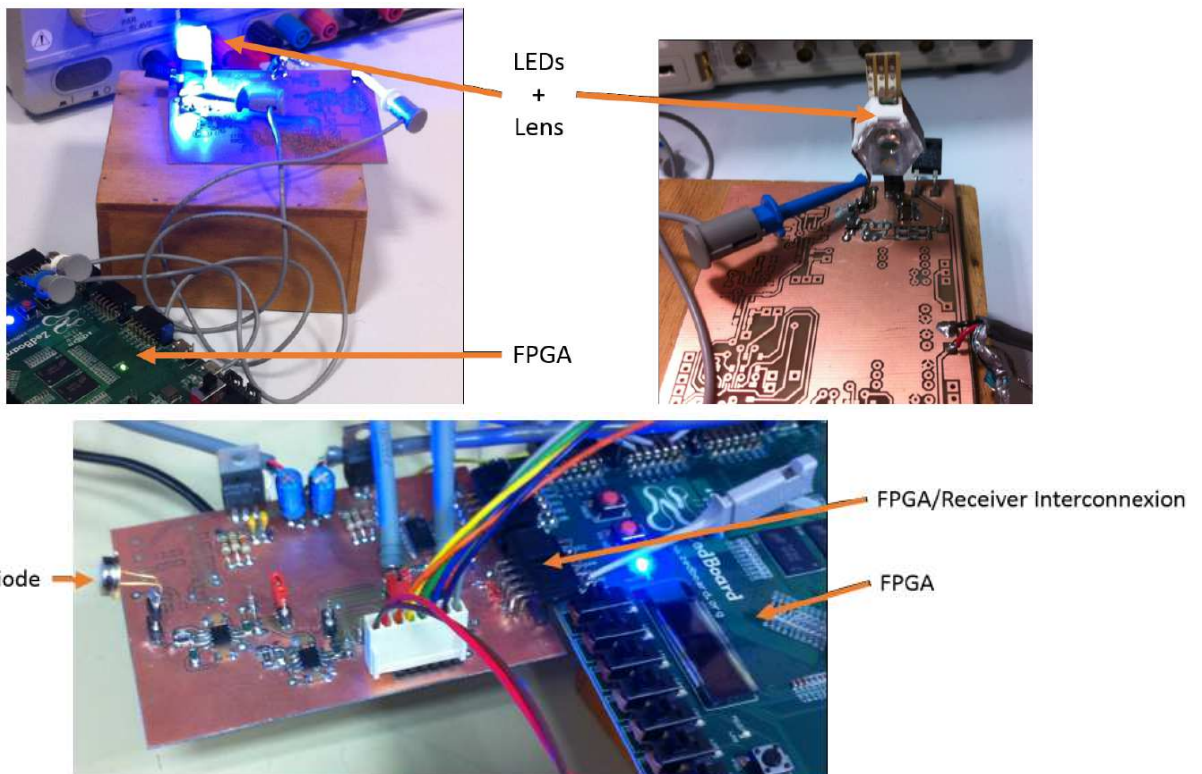


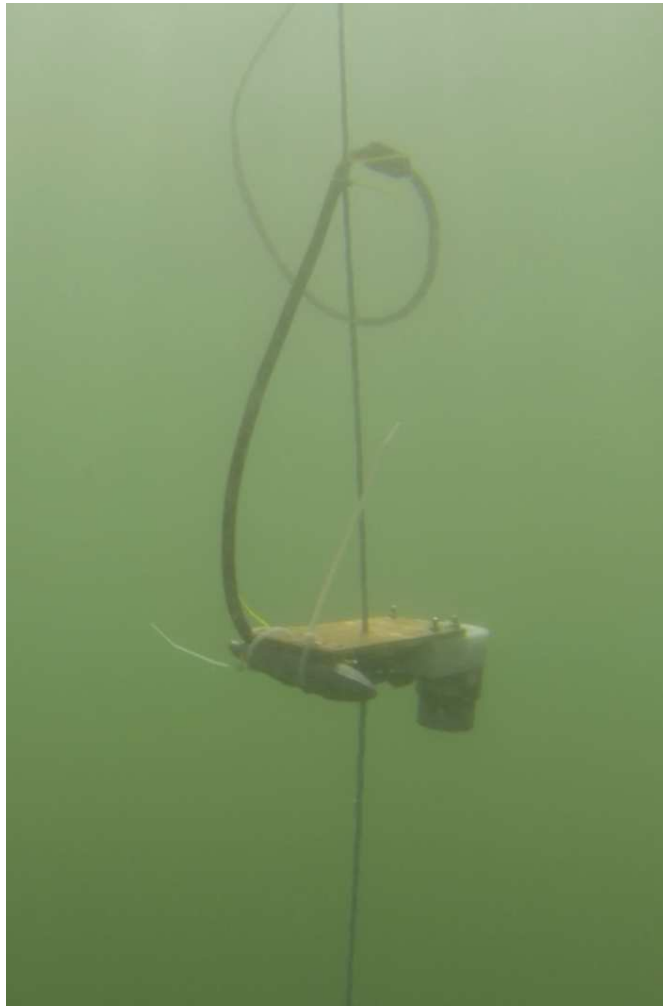
Figure 12 : Emetteur et récepteur optiques, qui devraient être embarqués dans les mini-AUVs.

En parallèle, pour préparer de futures expériences impliquant plusieurs robots sous-marins communiquant par acoustique 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).



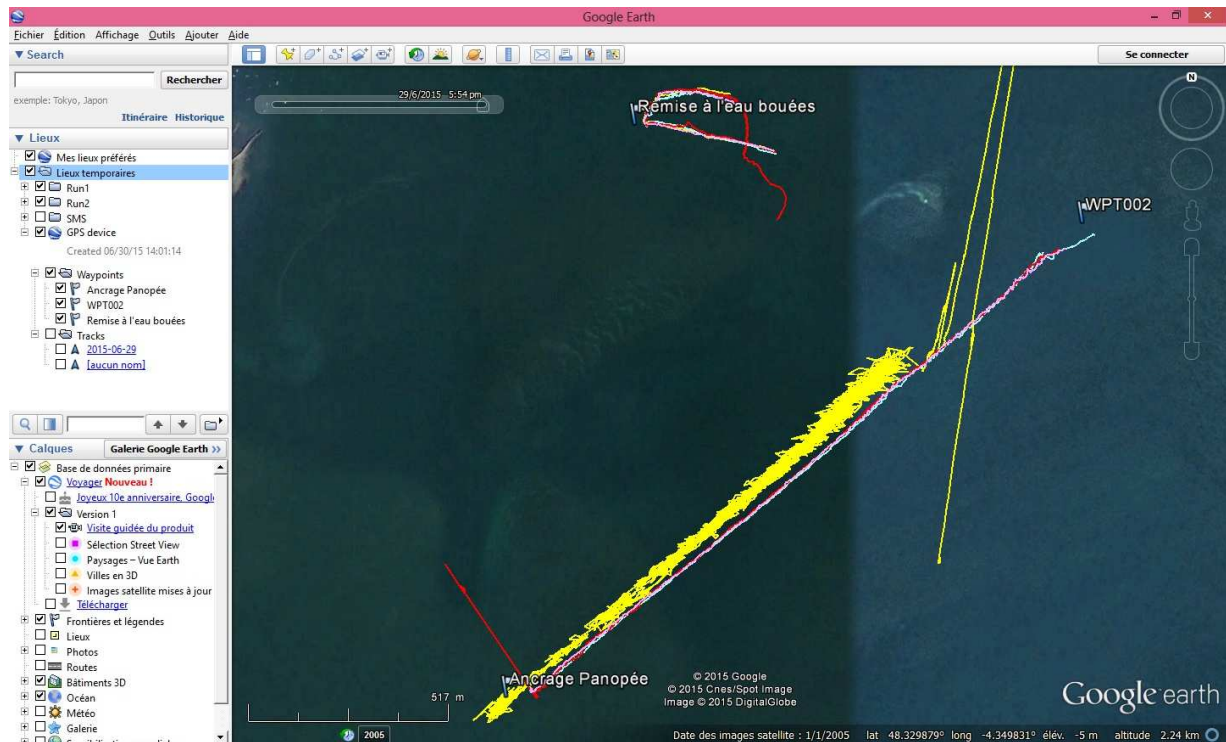
**Figure 13 : Les 4 bouées en train d'être mises à l'eau.**





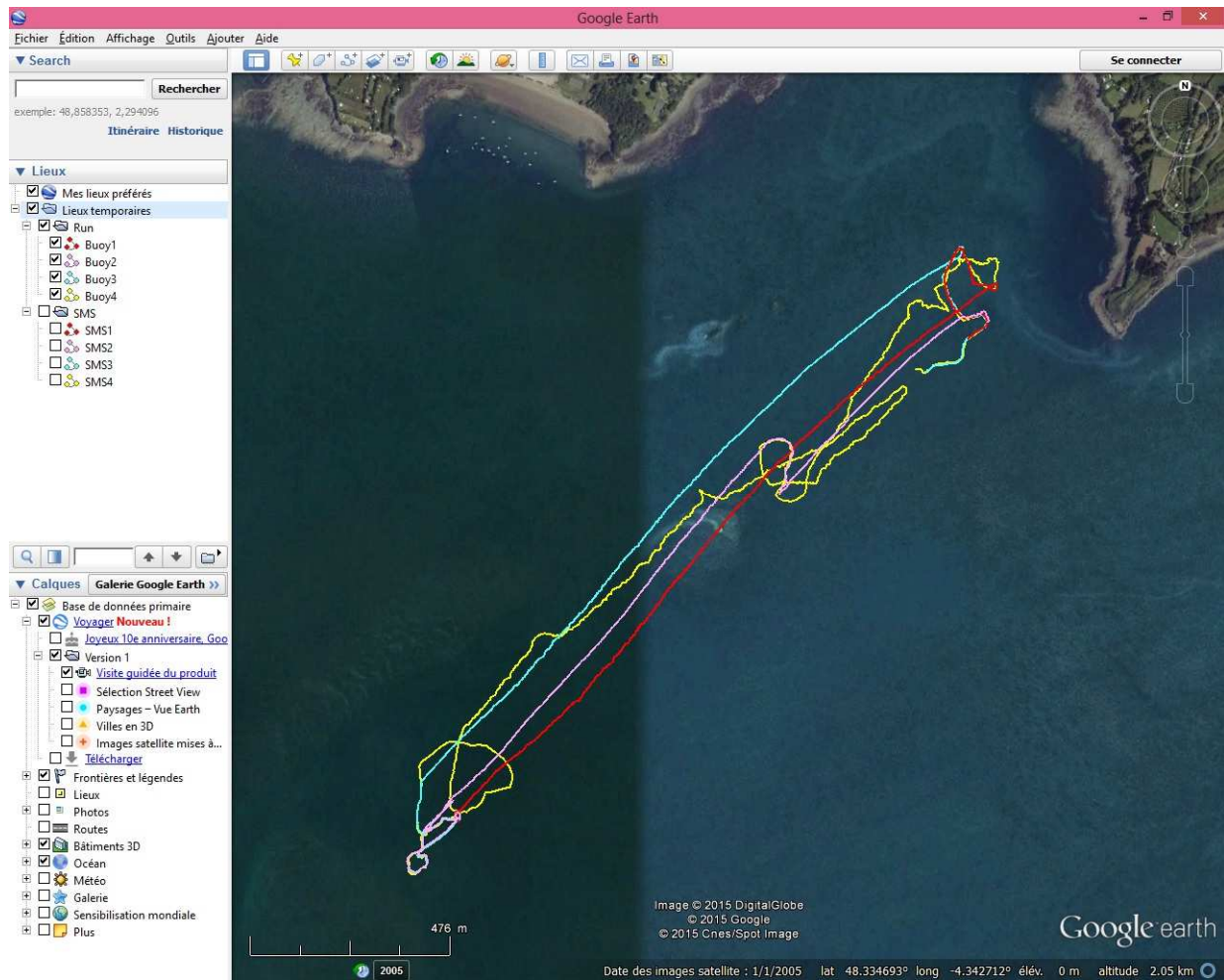
**Figure 14 : Modem acoustique Tritech installé sous chaque bouée. Ce type de modem à bas coût n'étant pas fait à l'origine pour fonctionner correctement à 4, un dispositif a été mis au point pour l'allumer et le reconfigurer automatiquement pour pouvoir effectuer les mesures de distances souhaitées.**

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



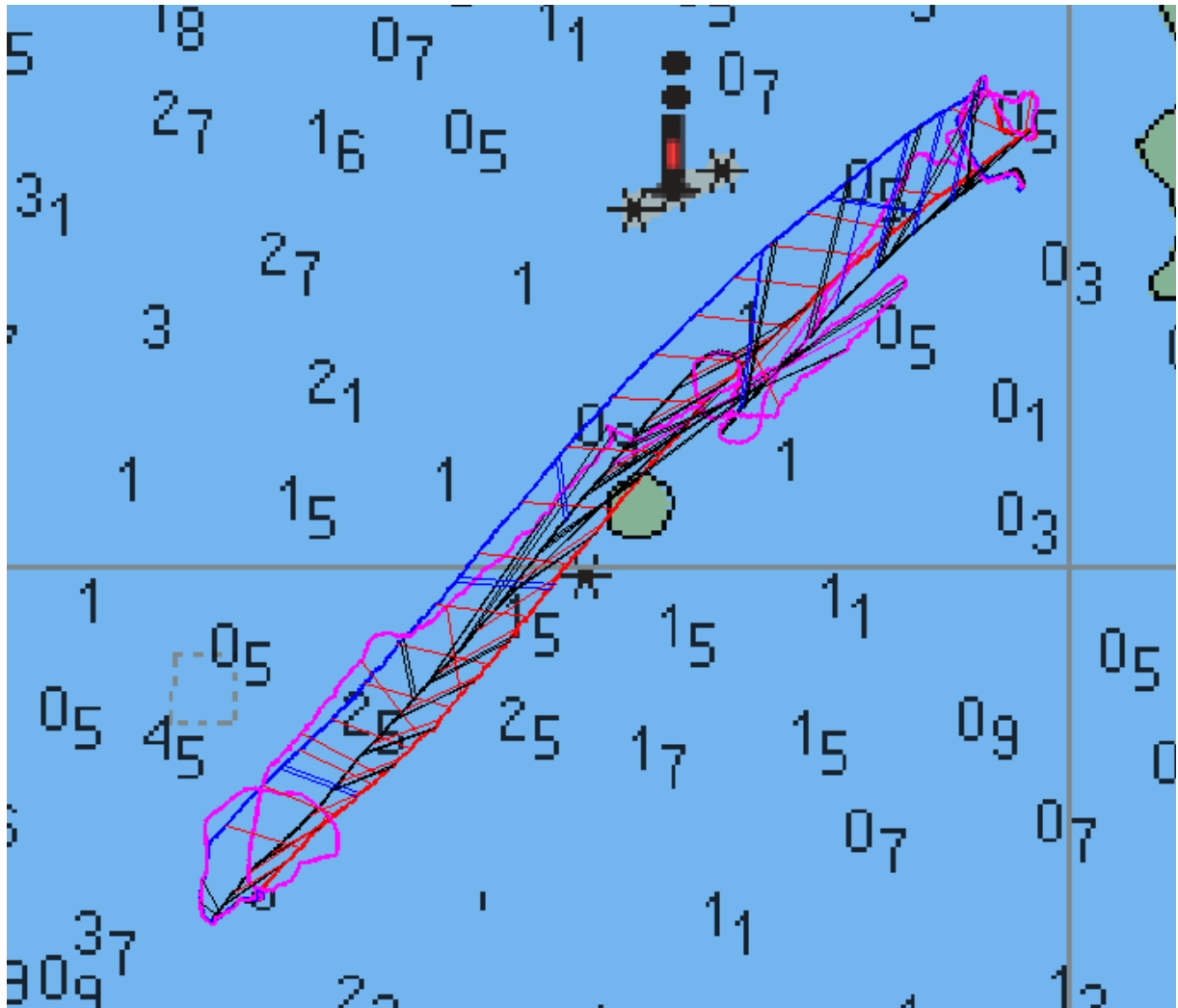
**Figure 15 : Dans cette expérience (29 Juin 2015), les 4 bouées ont été mises à l'eau au même endroit en rade de Brest et ont été laissées à la dérive pendant environ 2 fois 2h. Les tracés de différentes couleurs correspondent aux coordonnées GPS de chaque bouée. Pendant toute l'expérience, des distances 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<sup>er</sup> 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 16 : 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).**

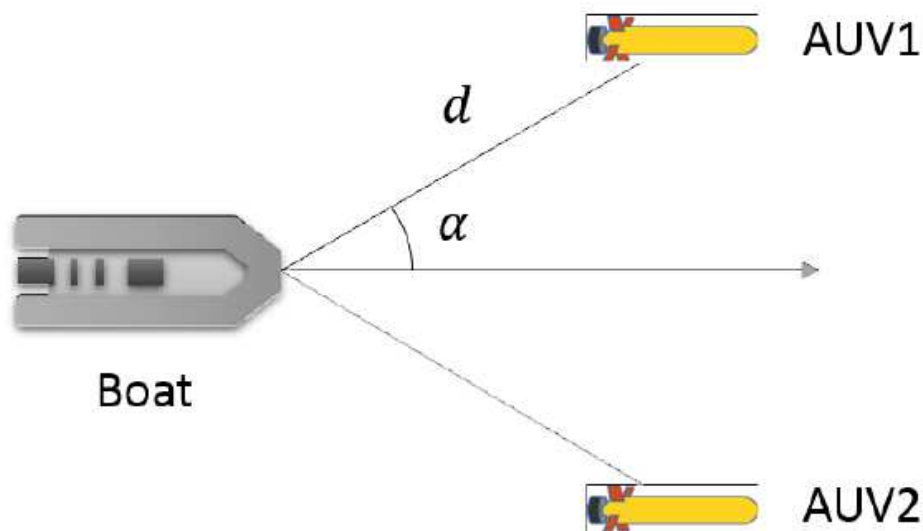




**Figure 17 : Sur cette figure, les différentes mesures de distance faites par les modems sont représentées par un trait dessiné à la position d'émission correspondante (rouge, noir, bleu, violet selon la bouée émettrice).**

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, Mohamed Saad IBN SEDDIK et Simon ROHOU, pour localiser efficacement une meute de robots sous-marins (voir e.g. [10]).

En parallèle de ces expériences, des travaux ont aussi été effectués avec RTsys, à la suite du projet COMET. Les AUVs d'RTsys construits dans le cadre du projet ont pu être utilisés pour réaliser une démonstration du fonctionnement de meutes de robots hétérogènes. Le cas d'utilisation retenu pour démontrer la capacité de drones à naviguer et à se localiser de manière coordonnée est le suivant : le système est composé d'un bateau et de deux drones sous-marins. Les AUVs doivent précéder le bateau en gardant une position fixe dans son repère.



**Figure 18 : Principe du projet effectué en collaboration avec RTsys.**

La partie théorique de ce projet a été travaillée dans le cadre d'un projet étudiant (Projet SCOUT : <https://www.youtube.com/watch?v=gwxfMg5oRSA>), et continuée à travers le stage de fin d'études de Thomas LE MEZO. Des simulations et une expérience démontrant le fonctionnement de l'algorithme sur les AUVs de RTsys a été faite en mer.



**Figure 19 : Expérience de formation en meute avec les sous-marins de RTsys.**

En plus de ces tests, une expérience en mer avec le sous-marin Daurade et le GESMA (avec l'aide d'Alain BERTHOLOM et Benoit DESROCHERS) a été effectuée pour récupérer un jeu de données pour illustrer de futurs travaux de Simon ROHOU sur la localisation par mesures scalaires (e.g. localisation d'un AUV par mesures bathymétriques). Ce travail repose

sur les résultats de la thèse de Clément AUBRY (détection de boucles par mesures proprioceptives) et serait étendu par un couplage avec des mesures extéroceptives (e.g. bathymétrie).

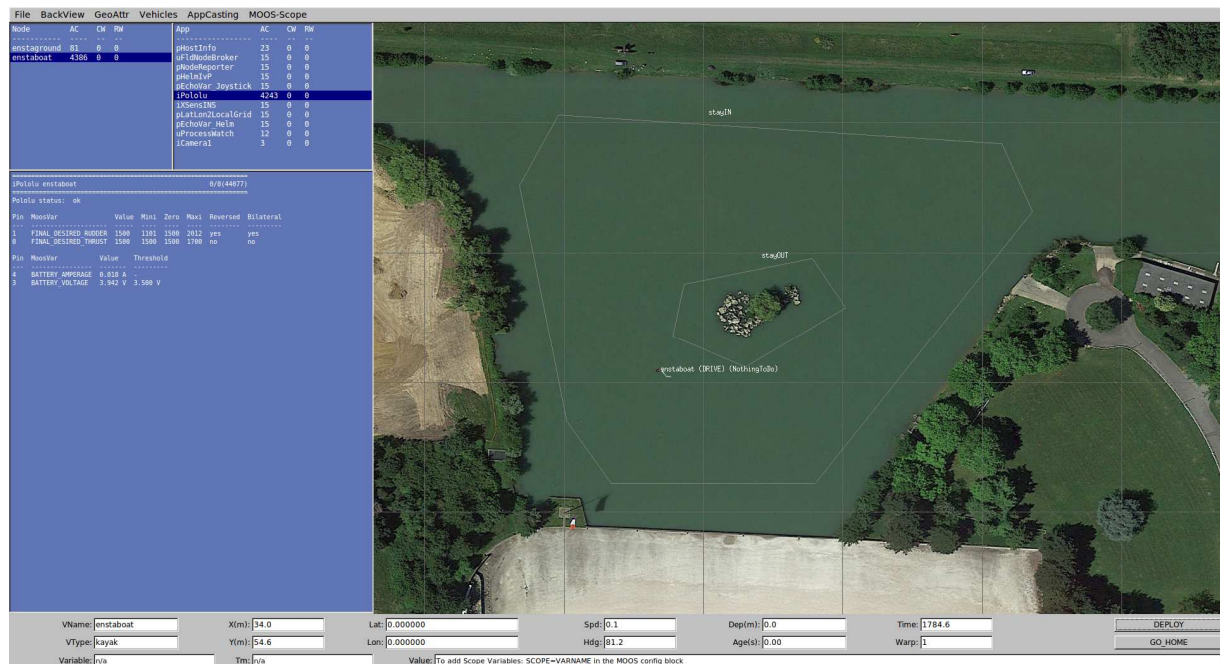
## **Démonstration d'un bateau à moteur pour le Forum DGA Innovation**

A l'occasion du Forum DGA Innovation 2015, nous avons présenté notre robot bateau à moteur pour illustrer une application du calcul par intervalles à la sécurité des robots autonomes. Dans cette démo, le robot évoluait sur un lac, avec deux clôtures (virtuelles) de sécurité : il était contrôlable par joystick à l'intérieur de ces clôtures, et devenait autonome lorsqu'il en sortait, pour revenir automatiquement dans la zone de sécurité.



**Figure 20 : Bateau navigant sur le lac de l'Ecole Polytechnique.**





**Figure 21 : Interface de monitoring du bateau.**

## EASIBEX, pylbex et IAMOOC : des initiatives pour rendre le calcul par intervalles accessible à tous

EASIBEX est un outil simple fait pour débiter facilement avec l'arithmétique des intervalles et la propagation de contraintes. Il utilise la bibliothèque IBEX (voir [5]) en interne et est conçu pour les personnes ne connaissant pas bien le C++, Python, les concepts de programmation orientée objet, mais qui souhaiteraient faire des tests rapides d'algorithmes utilisant les intervalles et les contracteurs. 2 versions sont disponibles : EASIBEX-MATLAB et EASIBEX-CPP.

Les principaux buts d'EASIBEX sont les suivants :

- Débuter avec le calcul par intervalles et la propagation de contraintes.
- Prototyper et tester rapidement de nouveaux algorithmes.

Les utilisateurs ciblés sont principalement :

- Les étudiants.
- Les scientifiques ne connaissant pas bien les langages de programmation et notions telles que le C++, Python, la programmation orientée objet, mais qui souhaiteraient utiliser des algorithmes intervalles classiques pour traiter leurs problèmes particuliers, ou prototyper de nouveaux algorithmes.

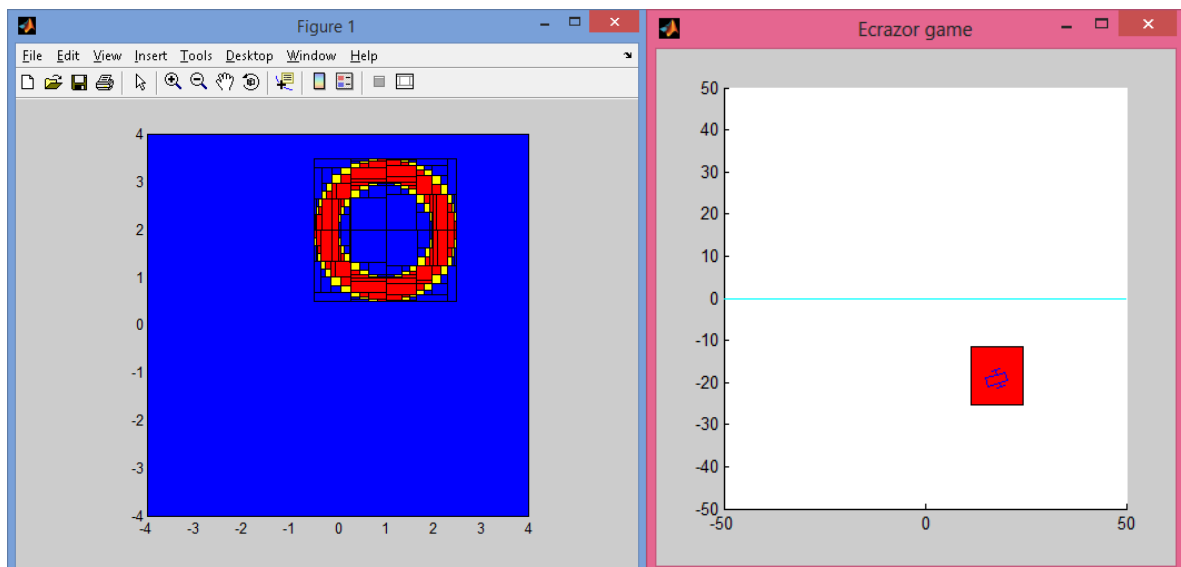
La philosophie d'EASIBEX est la suivante :

- EASIBEX-MATLAB a été mis au point pour être une interface MATLAB très simple d'IBEX pour pouvoir bénéficier de nombreux algorithmes existants.
- Les conventions de nommages et d'utilisation sont fortement inspirées de la bibliothèque d'intervalles utilisée dans de nombreux exemples existants (voir [6], [7]).
- EASIBEX peut être utilisé avec VIBes (A Visualization for Intervals and Boxes, voir [8]) pour dessiner facilement les résultats des calculs.

Voici les quelques limitations actuelles :

- Pour pouvoir rester simple, toutes les fonctionnalités d'IBEX ne sont pas disponibles dans EASIBEX.
- Même si les calculs sont effectués par des fonctions d'IBEX en interne, la garantie des résultats (liée aux arrondis...) peut être perdue lors du passage de paramètres ou de la récupération des valeurs de retours à travers les fonctions MATLAB et les appels de bibliothèque dynamique. Ceci n'est en général pas un problème, notamment en robotique où il y a toujours des bruits divers à prendre en compte pour être robuste.
- Les fonctions sont simplifiées et différentes d'IBEX pour éviter les difficultés liées à la programmation orientée objet (IBEX utilise des notions telles que l'héritage, le polymorphisme, etc.).

S'il y a besoin de programmer en C++, EASIBEX-CPP fournit un moyen simple pour commencer à utiliser IBEX en C++ facilement, sans connaissances avancées en programmation orientée objet. Des guides et exemples sont disponibles sur [9]. Une fois que les notions d'intervalles, contracteurs et C++ sont maîtrisées, on peut alors commencer à utiliser directement IBEX pour plus de possibilités et d'efficacité.



**Figure 22 : Exemples de problèmes simples traités avec EASIBEX-MATLAB.**

Différents travaux ont été aussi présentés lors de la conférence SWIM 2015 à Prague (voir [3], [4], [5], [6], [7], [8]), donc Luc JAULIN est dans le comité d'organisation. 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.

En parallèle d'EASIBEX-MATLAB, une interface Python pour IBEX a aussi été développée : pyIbex (<https://github.com/benEnsta/pyIbex>).

A la suite du développement de ces outils, un MOOC (Massive Open Online Course) présentant le calcul par intervalles avec des applications simples a été mis en place : IAMOOC (<http://iamooc.ensta-bretagne.fr/>). Celui-ci propose notamment d'utiliser pyIbex dans certains exercices.

## Projets étudiants : drone aéro-sous-marin et interception de drones

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 effectué l'année dernière en projet de fin d'études à l'ENSTA Bretagne pour commencer à étudier l'automatisation des avions, et réfléchir à comment l'adapter pour une telle mission. Ce projet est continué par un groupe d'étudiants, et nous espérons aboutir à une première forme de prototype.

En parallèle, 2 étudiants de l'ENSTA Bretagne ont effectué leur projet de fin d'études pour réfléchir sur des techniques d'interception de drones par d'autres drones, notamment en essayant de garder intact le drone capturé.

## 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.