

**Convention de subvention DGA-DS/ENSTA Bretagne**  
**n°2012.60.0010.00.470.75.01**  
**Année 2014-2015 - fourniture 1**

**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 débiter 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](http://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. Des tests avec l'Ifremer et le robot voilier autonome VAIMOS (Voilier

Autonome Instrumenté pour Mesures Océanographiques de Surface) pourront aussi être faits.

- 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](http://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.

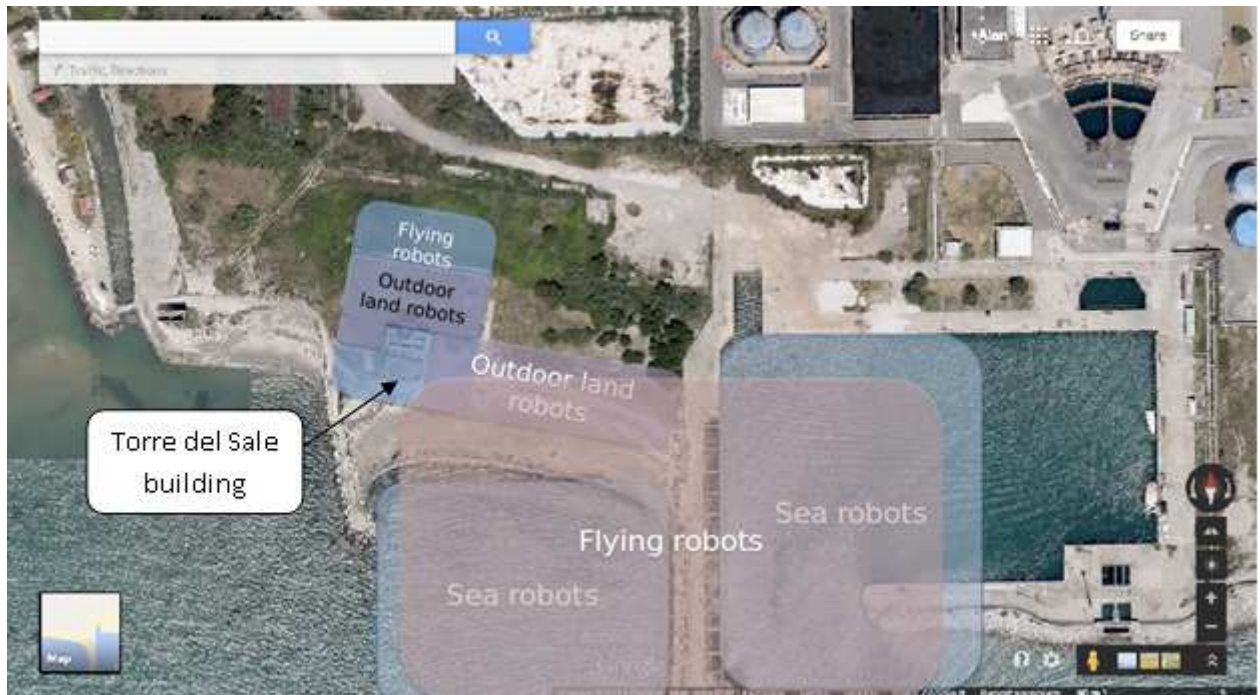
## Déroulement de l'année

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 : 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 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](http://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.**

Les épreuves définies impliquent donc des tâches déjà demandées dans les éditions précédentes du concours (euRathlon 2013 concernait la robotique terrestre et euRathlon 2014 la robotique marine et sous-marine), ainsi que des nouvelles (principalement pour la robotique aérienne). Les problèmes soulevés regroupent notamment ceux des concours ETAS, CAROTTE, SAUC-E, qui ont déjà montré leur importance pour la DGA.



**Figure 2 : OPI (Object of Potential Interest) trouvé avec notre robot terrestre pendant euRathlon 2013.**

Ainsi, nous prévoyons d'y participer avec les robots suivants:

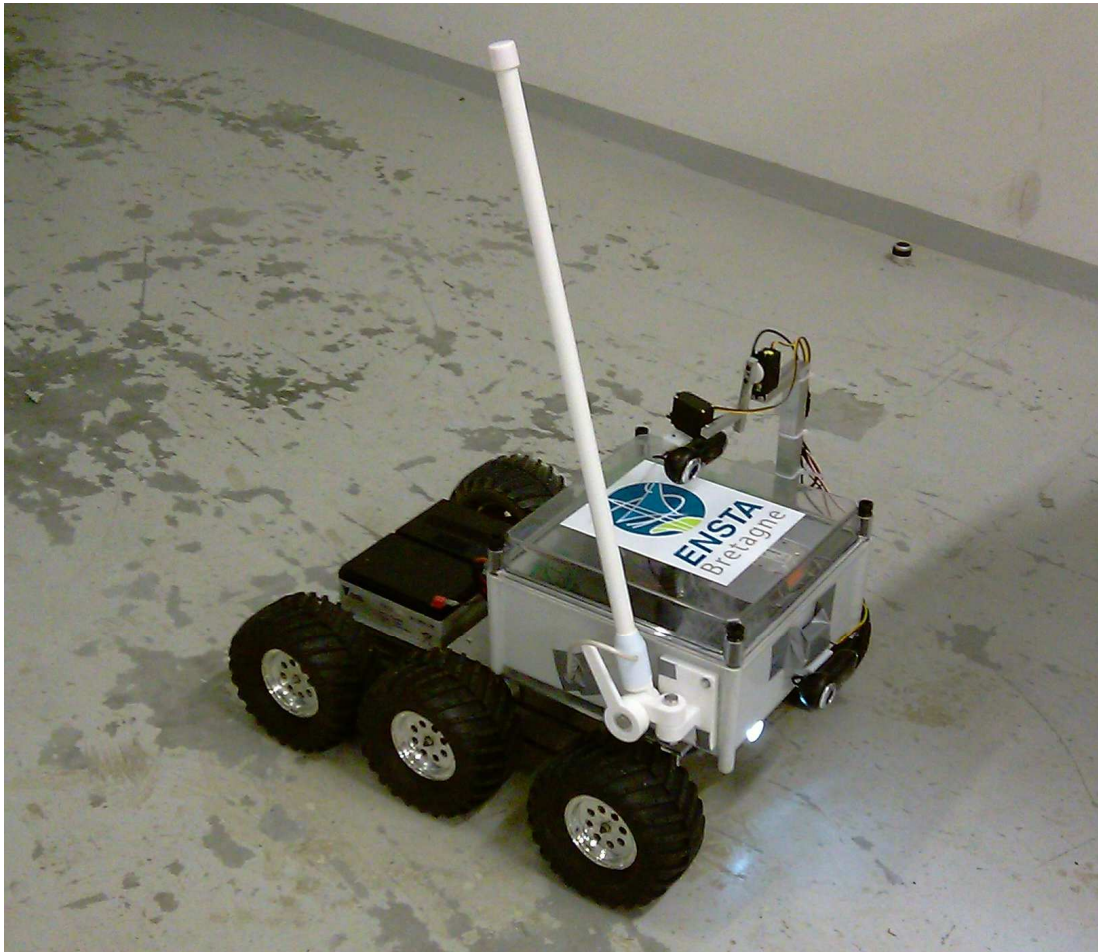
- SAUC'ISSE et SARDINE : les 2 robots sous-marins les plus anciens, gagnants de SAUC-E 2014. Ils devraient être peu modifiés.



Figure 3 : SAUC'ISSE et SARDINE.

- Un nouveau robot sous-marin, actuellement en construction. Les ROVs (Remote Operated Vehicles) CISCREA achetés il y a plusieurs années ayant montré leurs limites aux concours précédents, ils sont actuellement tous en maintenance et devraient rester réservés à des tests en piscine ou en rade de Brest pour limiter leur usure. De ce fait nous prévoyons de construire assez rapidement de nouveaux robots, plus adaptés à nos besoins. Notre objectif est de pouvoir appliquer les travaux de la thèse de Simon ROHOU sur ces nouveaux robots. Le concours euRathlon 2015 sera une bonne occasion de tester le premier robot construit.
- Le robot à 6 roues construit à l'origine pour le concours ETAS 2004 et réutilisé pour euRathlon 2013. Des réparations et améliorations sont en cours pour le remettre à jour et en état. Le 2<sup>ème</sup> robot construit pour ETAS 2007 et 2008 pourrait aussi être utilisé.





**Figure 4 : Robot utilisé pour euRathlon 2013.**

- Un nouveau robot à chenilles basé sur une plateforme bon marché du commerce.
- Un quadrirotor d'intérieur et un quadrirotor d'extérieur. Le quadrirotor d'intérieur sera compact (pour passer les portes) et équipé de capteurs vidéos, laser, infrarouges, ultrasons pour estimer au mieux sa trajectoire tout en cartographiant son environnement en 3D. Le quadrirotor d'extérieur sera équipé d'une caméra et d'un laser orientés vers le bas pour réaliser un mosaïquing de la zone à explorer, avec des informations sur le relief (carte 2.5D).



**Figure 5 : Quadrirotors en construction.**

## **WRSC/IRSC 2015**

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](http://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). Nous pensons y participer avec un nouveau voilier basé sur une coque de 2 m, si celui-ci est terminé à temps (plusieurs étudiants sont impliqués dans sa construction). Il devrait embarquer les mêmes algorithmes que VAIMOS (construit en collaboration avec l'Ifremer) et des nouveaux, tout en étant plus performant.

De plus, un bilan de notre organisation de la WRSC/IRSC 2013 devrait être présenté à la conférence OCEANS 2015 à Gênes, Italie le 20 Mai 2015, dans la session spéciale Education and Competition Initiatives in Marine Robotics.

## **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 sont actuellement en 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.

## **EASIBEX: un outil simple pour débiter avec la propagation de contraintes par intervalles**

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.

## Localisation de sous-marins

En parallèle de la préparation des robots, nous travaillons aussi sur des améliorations de l'algorithme de localisation par calcul par intervalles d'un robot dans une piscine 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.

De plus, pour préparer de futures expériences impliquant plusieurs robots sous-marins communiquant entre eux, des tests ont été effectués en mer pour tester différentes configurations possibles. Un protocole de communication est en cours de développement pour pouvoir utiliser simplement et efficacement nos modems Trittech sur 4 robots sous-marins, pour pouvoir communiquer des données et mesurer des distances inter-robots. Ceci permettra par la suite 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]).

## 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] G. Chabert, IBEX, an Interval-Based EXplorer, <http://www.ibex-lib.org> .
- [6] <http://www.ensta-bretagne.fr/jaulin/>
- [7] <https://github.com/ENSTABretagneRobotics/interval/>
- [8] <http://enstabretagnerobotics.github.io/VIBES/>
- [9] <https://www.ensta-bretagne.fr/jaulin/easibex.html>
- [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.