

Calcul ensembliste pour la robotique: développement de robots marins, sous marins, terrestres ou aériens pour l'exploration

Fourniture 1 2012 (convention MRIS 2009-2012)

F. Le Bars, A. Bethencourt, J. Sliwka, L. Jaulin

ENSTA Bretagne

16 Avril 2012

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 et robustes, télé-opération, autonomie, localisation robuste, SLAM (Simultaneous Localization And Mapping), détection et reconnaissance d'objets, collaboration entre robots...

Voici les principaux travaux en cours :

- Voilier autonome VAIMOS (Voilier Autonome Instrumenté pour Mesures Océanographiques de Surface) de l'IFREMER. Le but de l'IFREMER est d'obtenir un robot capable de remplacer et/ou compléter les outils existants (navires océanographiques, bouées fixes et dérivantes, véhicules de surface téléopérés...) qu'ils ont pour faire effectuer des missions de mesures des paramètres de la surface de l'eau de plusieurs mois. Un voilier autonome peut quadriller une zone voulue sans dériver aléatoirement selon les courants et vents et sans consommer beaucoup d'énergie. En dehors de l'océanographie, ce type de véhicule pourrait remplir d'autres missions : surveillance autonome de l'entrée d'un port, support de surface pour une meute de robots sous-marins...
- Robots sous-marins autonomes et concours SAUC-E 2012. Cette année, nous prévoyons de présenter 2 équipes : une première avec les AUVs SAUC'ISSE et SARDINE utilisés les années précédentes, et une deuxième, avec 4 ROVs de la société CISCREA achetés récemment et que l'on est en train d'équiper pour les transformer en AUVs. En marge de ce concours et en lien avec d'autres travaux à l'école, nous continuons à étudier les problèmes de localisation, contrôle, et collaboration de robots sous-marins et marins.
- Coupe de France de Robotique 2012. En lien étroit avec les algorithmes développés pour la localisation robuste de SAUC'ISSE, nous avons cherché à utiliser les robots fabriqués pour ce concours pour tester et comparer différentes méthodes de localisation.

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 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 du boîtier Labjack 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. Actuellement, en plus des personnels de l'équipe robotique de l'ENSTA Bretagne, nous avons des étudiants et doctorant travaillant sur les robots de la Coupe de France de Robotique, des stagiaires sur les différents robots sous-marins de l'école et un étudiant a travaillé sur VAIMOS.

Robotique marine : VAIMOS



Figure 1 : VAIMOS en mer

Pour pouvoir effectuer des mesures océanographiques, l'IFREMER a réalisé un robot voilier de 3.65m basé sur une coque de Mini-J et un gréement de type balestron : VAIMOS (Voilier Autonome Instrumenté pour Mesures Océanographiques de Surface). Ce robot possède une sonde et des pompes permettant de mesurer divers paramètres à la surface de l'eau et à un mètre de profondeur (température, salinité, chlorophylle, turbidité...), une carte informatique embarquée ARMADEUS (utilisée dans des cours de robotique à l'ENSTA Bretagne), une station météo (qui donne la direction et la force du vent ainsi que la position GPS), une centrale inertielle, un dispositif de communication Wifi et satellitaire et les actionneurs nécessaires au contrôle de sa voile et du gouvernail.

Son but est de remplacer/assister les navires océanographiques, bouées fixes et dérivantes utilisés actuellement qui ont chacun leurs inconvénients : mobilisation de tout un équipage et coût très élevé pour l'utilisation d'un navire océanographique, difficultés d'installation d'un support pour les bouées fixes dans les zones de grands fonds, dérive des bouées non fixes par rapport à la zone d'étude désirée... Un voilier autonome a plusieurs avantages :

- Autonomie énergétique quasi illimitée : il utilise l'énergie du vent pour se déplacer, du soleil, de la mer pour recharger les batteries de son électronique (qui consomme très peu comparé à un moteur de bateau par exemple).
- Charge utile importante par rapport à ses dimensions.
- Précision (par rapport aux bouées dérivantes) et simplicité de mise en place (par rapport aux bouées fixes). Il suffit de lui programmer un trajet prédéfini et de le lancer du port pour qu'il rejoigne la zone d'étude, fasse un quadrillage de cette zone tout en enregistrant des mesures et communiquant par satellite quelques résultats puis revienne à son port d'attache.
- Faible coût (de l'ordre de 20000€ hors sonde pour VAIMOS par exemple).



Figure 2 : VAIMOS effectuant une mission à proximité d'un navire océanographique de l'Ifremer

En plus des missions océanographiques, ce type de robot peut avoir d'autres utilités :

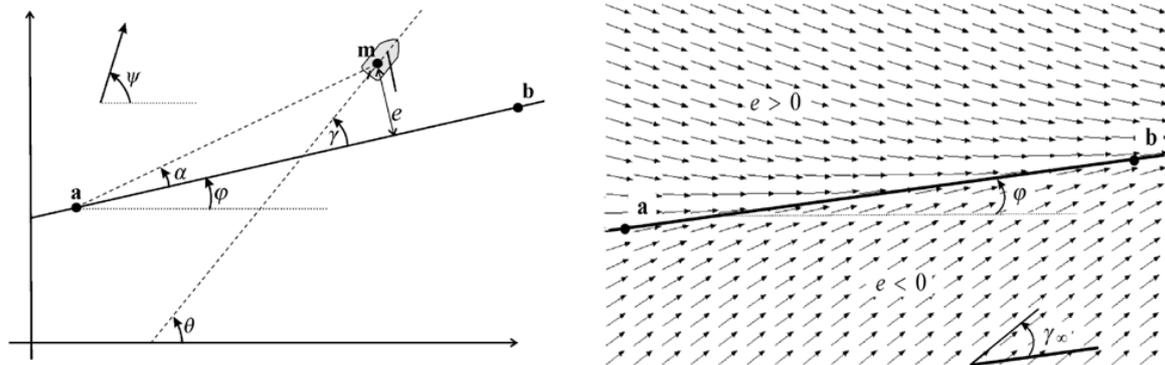
- Surveillance continue de l'entrée d'un port. Grâce à sa grande autonomie énergétique et son faible coût, de nombreux robots de ce type pourraient être déployés pour surveiller la circulation locale en surface et sous-marine d'une zone et renforcerait ainsi considérablement les dispositifs utilisés actuellement.
- Meute de robots hétérogènes. Les meutes de robots sous-marins autonomes peuvent servir à surveiller et intervenir dans une zone de manière rapide et furtive, cependant l'utilisation de mini-sous-marins seuls montre actuellement un certain nombre de limitations :
 - Difficultés à récupérer de l'énergie sous l'eau. Ainsi, les mini-robots sous-marins autonomes peuvent difficilement être déployés sur de longues distances et durées.
 - Localisation/communication difficile en mode passif (impossible d'utiliser un capteur qui émet si on souhaite rester furtif).

L'ajout de voiliers autonomes de surface à ces meutes pourrait résoudre certains problèmes : transport sur de longues distances, récupération d'énergie, communications avec la base et les bateaux environnants, localisation grâce au GPS...

L'ENSTA Bretagne participe à l'automatisation de VAIMOS pour qu'il soit capable de réaliser de manière autonome un quadrillage de zone aussi précis que possible, tout en consommant le moins d'énergie possible. Pour cela, un algorithme de suivi de ligne a été mis au point. L'objectif est de garantir que le robot reste toujours dans un couloir prédéterminé d'une largeur de 25 m par exemple, malgré les manœuvres liées aux changements de cap, remontée au vent... Le voilier devient alors aussi précis qu'un bateau à moteur.

Du fait de l'existence de caps difficiles à suivre selon l'orientation du vent (inhérent à un voilier), son régulateur a 2 types de stratégies différentes : suivi direct et remontée au vent. Un étage de régulation de base effectue un suivi de cap. En mode de remontée au vent, le cap

à suivre est autour de l'angle du vent +ou- 45°. Le bateau oscille donc autour de l'angle du vent, l'amplitude des oscillations étant la largeur du couloir. La voile est bordée au maximum. En mode de suivi direct, le cap à suivre est autour de l'angle de la ligne formée par les 2 waypoints courants, avec un coefficient de rapprochement de la ligne dépendant de l'écart. La voile est ouverte selon la direction du vent par rapport au cap voulu.



$$\delta_g = \delta_{g \max} \cdot (\lambda \sin \gamma + (1 - \lambda) * \text{sign}(e))$$

Figure 3 : Formule de réglage du gouvernail en mode de suivi direct de ligne

La plupart des régulateurs existants ne font qu'un suivi de waypoints de base :

- Le robot suit un cap en direction de son waypoint.
- Le waypoint est atteint quand on s'en approche dans un rayon prédéfini.
- Problème : rien ne l'empêche de dériver entre les waypoints (à cause du courant...).
Exemple : IBOAT de l'ISAE (Toulouse), 1er robot voilier autonome à avoir effectué 100 km (juin 2011).

Pour tenter de valider le régulateur développé, plusieurs outils ont été utilisés :

- Validation par calcul par intervalles et méthodes de Lyapunov.
- Simulateur HIL (Hardware In the Loop).
- Expériences réelles dans la rade de Brest et entre Brest et Douarnenez.

Une nouvelle méthode par intervalles pour l'analyse de stabilité de systèmes linéaires a été mise au point. Le principe de cette approche est de représenter les systèmes incertains par des inclusions différentielles et d'appliquer ensuite des méthodes d'analyse de Lyapunov pour transformer le problème de stabilité en un problème d'inversion ensembliste. De cette manière, il est possible de démontrer que pour toutes les perturbations possibles :

- Il y a un sous-ensemble de l'espace d'état d'où le système ne peut s'échapper dès qu'il y entre.
- Si le système est en-dehors de ce sous-ensemble, il ne va pas rester en-dehors pour toujours.

Cependant, même si ces méthodes permettent de valider théoriquement la robustesse du régulateur (i.e. le fait que le robot va bien suivre sa ligne et rester dans son couloir), des méthodes supplémentaires doivent être utilisées pour ajuster les hypothèses faites (équations d'état, bornes sur les erreurs de mesures des capteurs,...). Un simulateur Hardware In the Loop permettant de simuler la trajectoire du robot sur ordinateur selon le trajet demandé et les

conditions de vent et de mer prévues tout en faisant bouger les actionneurs du robot comme s'il se croyait en mer pour étudier leur fatigue a donc été développé et utilisé pour préparer au mieux les expériences de validation réelles.

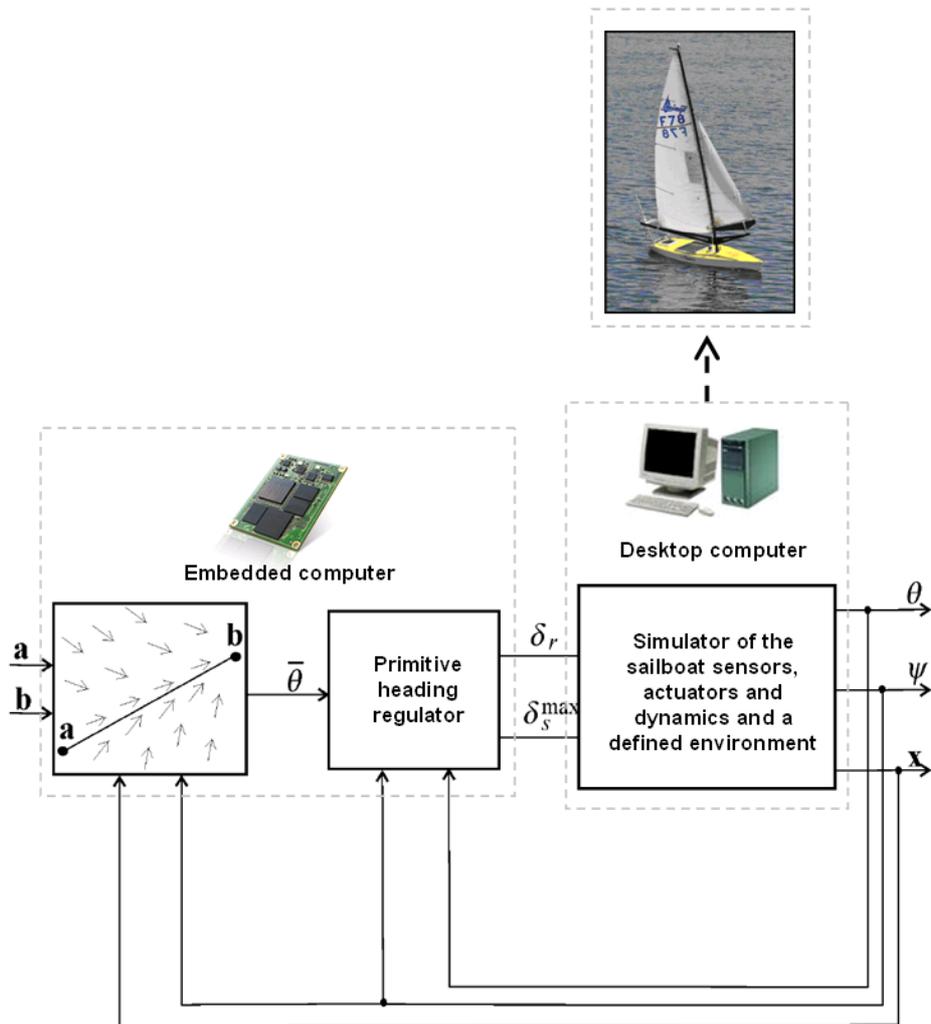


Figure 4 : Principe du simulateur HIL (Hardware In the Loop) utilisé pour tester et valider les algorithmes et actionneurs du robot, ainsi que planifier les missions réelles

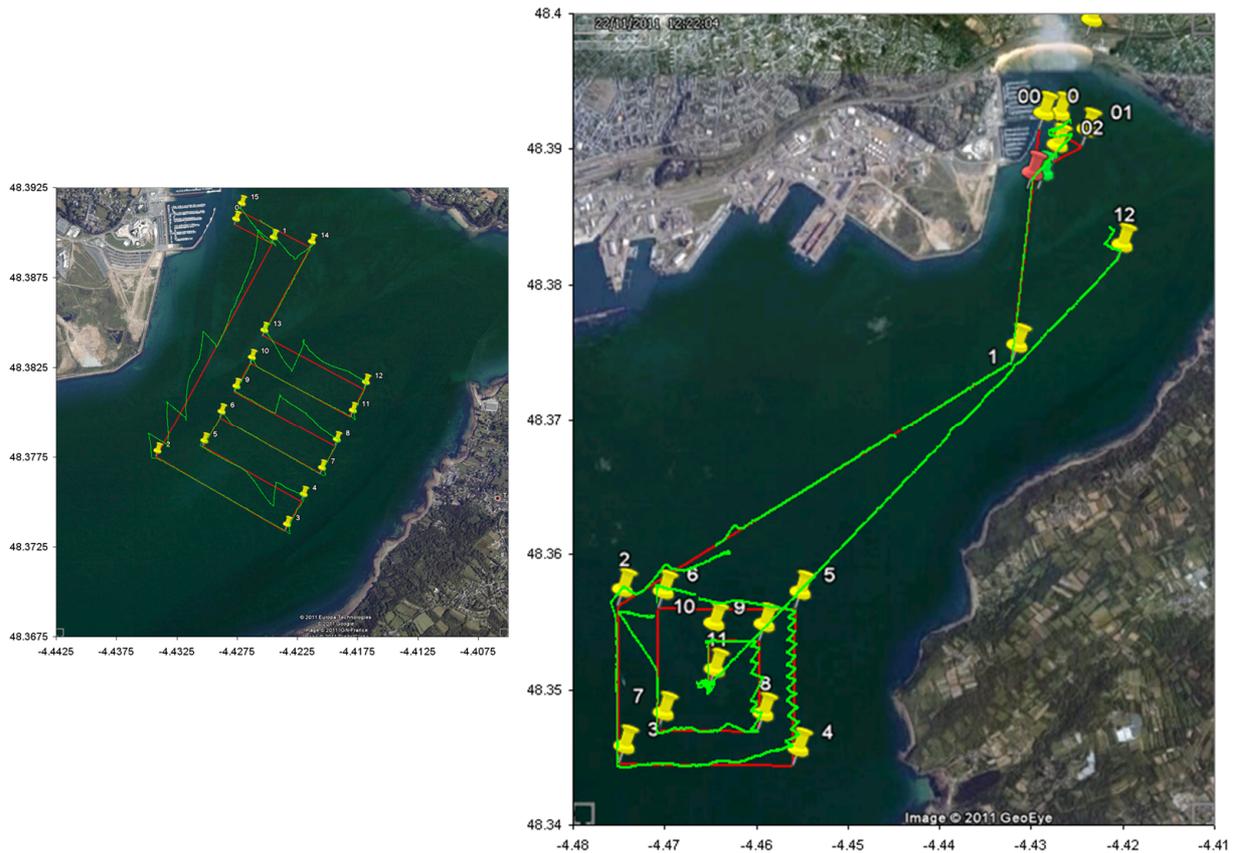


Figure 5 : Expériences faites dans la rade de Brest avec le voilier VAIMOS : le trajet prévu est indiqué par les lignes rouges (formées par les waypoints jaunes), le trajet réellement effectué est en vert. On voit parfois des sortes de zigzags autour de la ligne voulue : ceux-ci sont dus aux manœuvres de remontée au vent du bateau (le vent venait du Sud-Ouest en moyenne, pour l'expérience sur la figure de gauche, plutôt du Nord pour la figure de droite). On constate que le robot reste bien dans un couloir à 25 m près à tout moment

Après avoir fait quelques tests dans la rade de Brest, VAIMOS a été lancé pour une longue mission autonome en conditions d'utilisation réelles entre Brest et Douarnenez les 17-18 Janvier 2012 et a effectué plus de 500 mesures pour un trajet de 105 km en 19 h. C'était la 1ère fois qu'un voilier autonome effectuait une expérience de ce type.

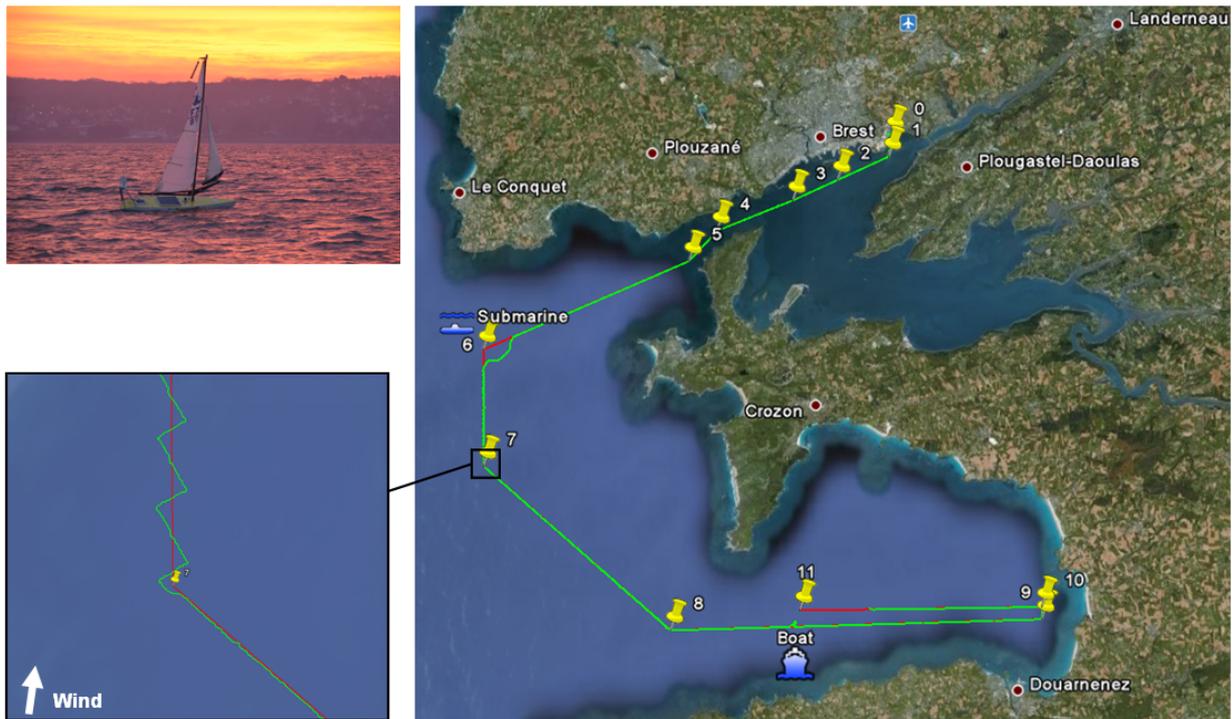


Figure 6 : Trajectoire Brest-Douarnenez voulue (lignes rouges formées par les waypoints jaunes) et effectuée (vert). Photo du voilier au départ le matin dans la rade de Brest et détail d'un passage de stratégie en remontée au près à une stratégie de suivi direct de la ligne, décidé par le robot. Le voilier a dû être dévié 2 fois pour laisser passer un sous-marin et un bateau. Le trajet total faisait plus de 100 km et a duré environ 19 h

Robotique sous-marine : SAUC-E

Comme tous les ans, l'ENSTA Bretagne participera au concours SAUC-E cette année. Il se déroulera du 6 au 13 Juillet à La Spezia, Italie comme les 2 années précédentes. Les épreuves devraient être proches de celles de 2011, avec en plus des épreuves libres et de collaboration par communication acoustique entre robots. Cette année, nous prévoyons de présenter 2 équipes :

- Une équipe avec les sous-marins existants SAUC'ISSE et SARDINE.
- Une nouvelle équipes avec des ROVs de la société CISCREA que l'on va modifier pour qu'ils soient capables d'effectuer les missions du concours.

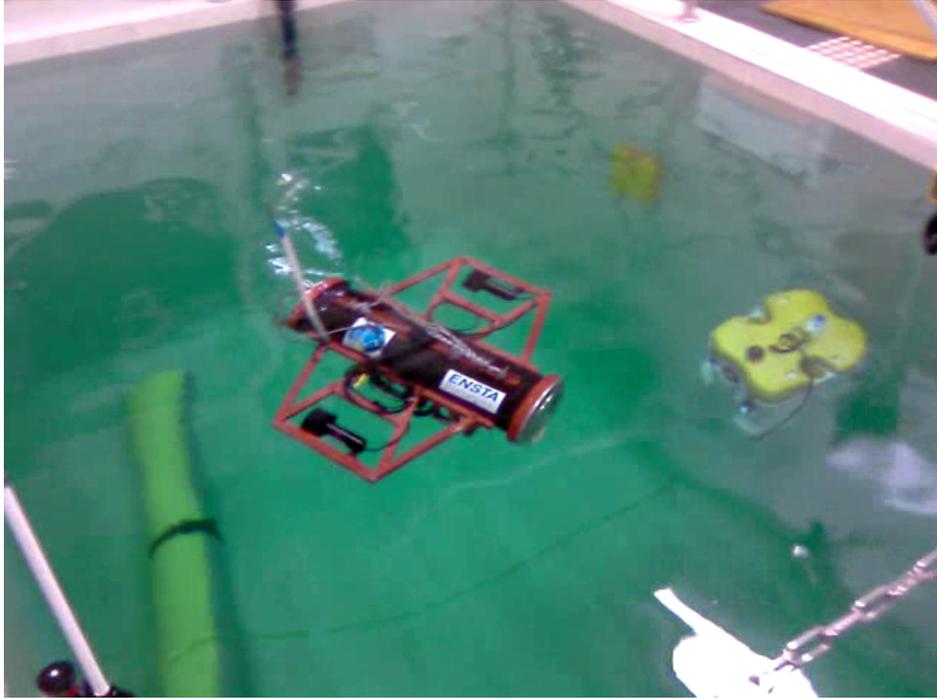


Figure 7 : SARDINE et un AUV CISCREA faisant des tests de régulations dans la piscine de l'ENSTA Bretagne

En marge de la préparation de ce concours, plusieurs autres travaux ont été effectués. Un algorithme de localisation robuste utilisant un sonar rotatif a été développé pendant les années précédentes et est actuellement fonctionnel. Celui-ci a été repris pour qu'il soit capable de fonctionner sur SAUC'ISSE avec un échosondeur à la place du sonar habituel. En effet, le coût d'un sonar de ce type (qui est l'un des moins chers) est de 6000€ environ, alors qu'un échosondeur peut coûter la moitié. Malgré le fait qu'un échosondeur n'émette que dans une seule direction, contrairement au sonar qui émet sur 360°, nous avons pu facilement adapter l'algorithme de localisation pour qu'il fonctionne avec l'échosondeur à la place du sonar. Le robot doit alors tourner sur lui-même de temps en temps pour détecter tous les murs de la piscine et effectuer des allers-retours autonomes.

Dans la même idée de réduction des coûts des capteurs utilisés, des tests ont été faits pour embarquer un télémètre laser rotatif sur SARDINE (à la place d'un sonar) et essayer d'améliorer la localisation en dead-reckoning lorsque le robot passe à proximité des bords de la piscine (la portée du télémètre laser étant assez faible dans l'eau).

De plus, des expériences de test de localisation grâce à un pinger acoustique placé au centre d'un bassin et 2 hydrophones montés sur SAUC'ISSE sont prévus prochainement. Ces tests sont notamment en lien avec les algorithmes de localisation utilisés sur le glider de l'ENSTA Bretagne.

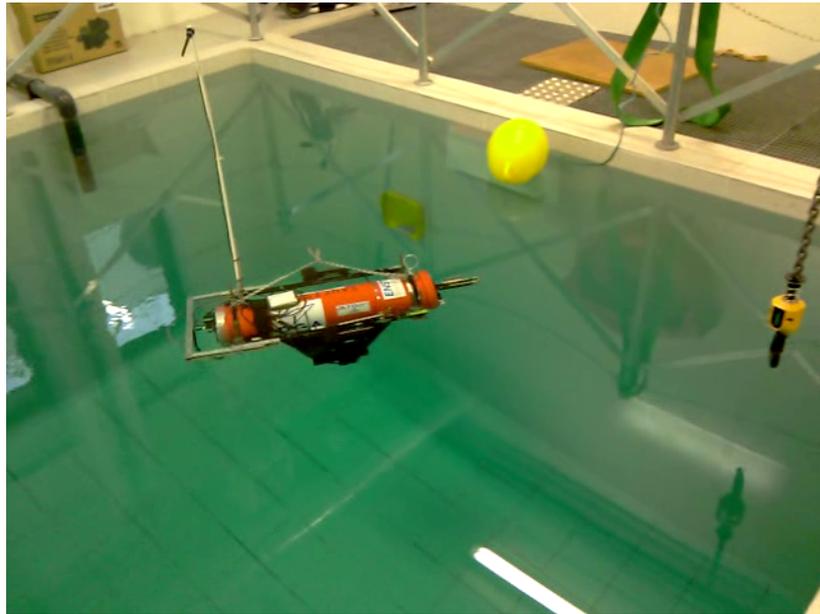


Figure 8: Localisation dynamique avec données aberrantes avec l'approche des accumulateurs intervalles, avec un échosondeur à la place du sonar habituel Ici, le sous-marin SAUC'ISSE effectue des allers-retours de manière autonome (2 waypoints dans la piscine ont été fixés) dans la piscine de l'ENSTA Bretagne (rectangulaire, de dimensions 3m*4m*3m)

D'autres travaux plus en lien avec les meutes de robots ont aussi été effectués. Nous développons actuellement des algorithmes utilisant l'analyse par intervalles pour calculer la position de robots sous-marins en essaims. La particularité de notre approche est de considérer les équations d'état de chaque robot afin de déterminer une boîte initiale autour de la position du robot, puis de contracter cette boîte quand un robot entre en communication avec un autre robot ayant potentiellement une boîte plus petite. Nous avons développé un simulateur 3D afin de tester nos algorithmes. Une vidéo de démonstration est disponible sur <http://youtu.be/0cjzsaWTvA>. On peut y voir deux trajectoires circulaires de commande des robots, ainsi que 6 sphères représentant les positions ordonnées aux robots. Chaque robot contient un régulateur qui le fait suivre sa commande au mieux. Le cube autour de chaque robot représente la boîte de positionnement calculée en accordance avec le bruit de mesure. Cette boîte grandit petit à petit jusqu'à ce que le robot obtienne des informations supplémentaires sur sa localisation soit par positionnement GPS (quand il monte en surface) soit en croisant un autre robot avec un positionnement plus précis (la communication entre deux robots est symbolisé par un trait rouge entre eux dans la simulation).

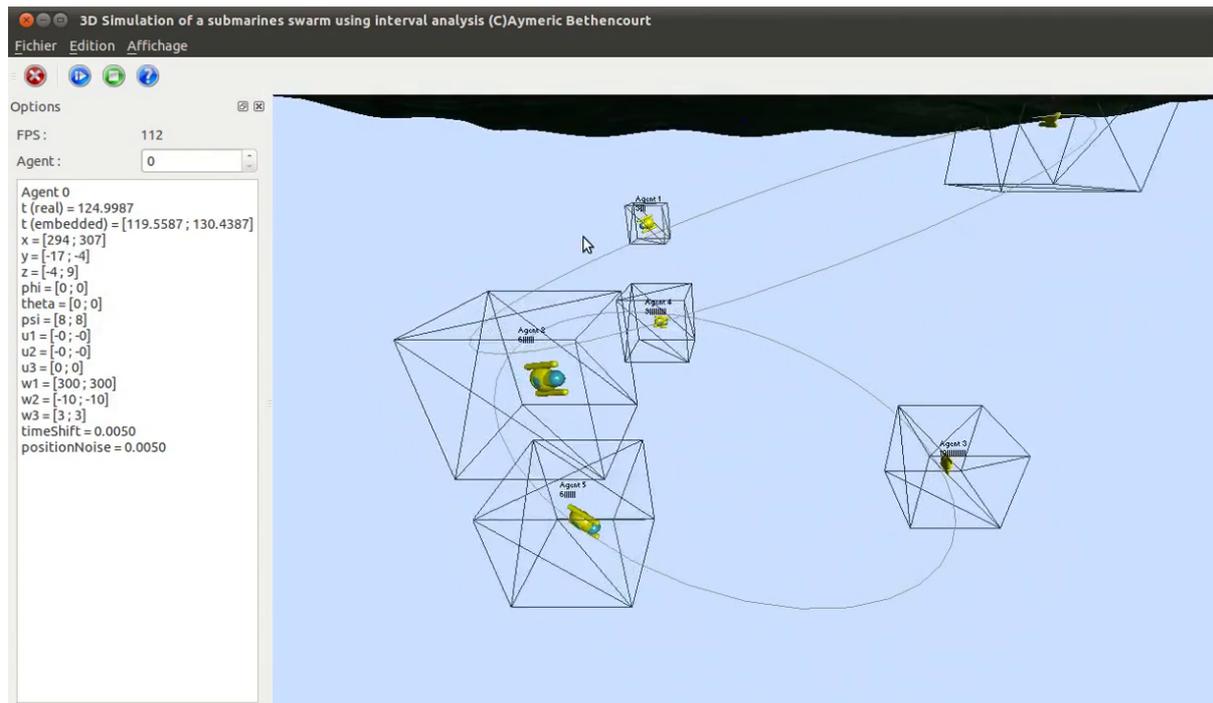


Figure 9: Simulateur de meute de robots sous-marins communiquant par acoustique lorsqu'ils sont à proximité pour améliorer leur localisation

Ces travaux sont en lien avec d'autres projets à l'école, comme le projet COMET.

Robotique terrestre : Coupe de France de Robotique

Cette année, l'ENSTA Bretagne participera à la Coupe de France de Robotique 2012. Le thème de ce concours cette année est « L'Ile au trésor ». 2 équipes s'affrontent sur une table de 2 m * 3m, avec un palmier au centre et 2 totems. Des lingots (en bois) et pièces (CD) sont à récupérer par un premier robot sur les totems, et à ramener sur le bateau de son équipe (zones marron rectangulaires). Un deuxième robot doit faire dérouler des messages contenus dans des « bouteilles à la mer » (en tapant dans des zones situées sur les bords de la table) et récupérer la « carte au trésor ».

Un algorithme de localisation précis et efficace peut aider grandement et même suffire à faire certaines épreuves. Pour cela, l'algorithme de localisation robuste par intervalles de SAUC'ISSE a été repris pour fonctionner sur un robot terrestre muni d'un télémètre laser rotatif. De plus, des comparaisons de ses performances dans plusieurs configurations possibles devraient être faites avec les différents algorithmes disponibles (algorithmes probabilistes) sous ROS, une plateforme logicielle dédiée à la robotique et assez utilisée pour ce type de compétition.

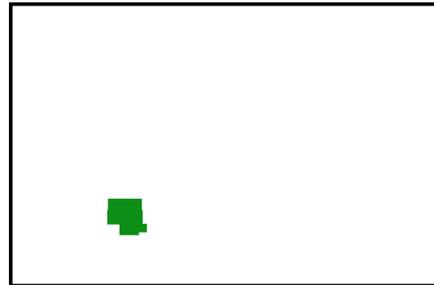
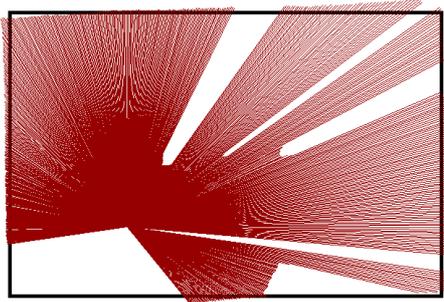
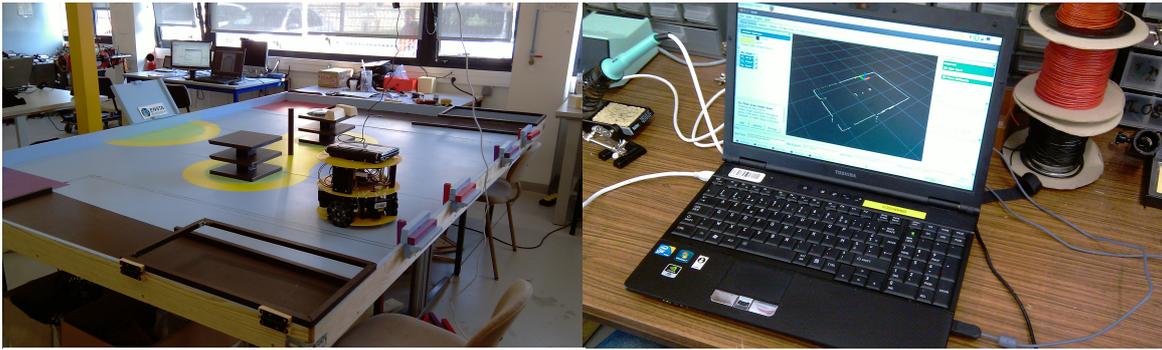


Figure 10: Réplication de la table de compétition avec l'un des robots préparé à l'école, localisation du robot avec les algorithmes de ROS (sur le PC portable) et résultats de l'algorithme de localisation ensembliste en bas avec en rouge les distances aux bords de la tables mesurées par les télémètres laser du robot et en vert la position estimée