

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

*Fourniture 3 (convention MRIS 2009-2012)
F. Le Bars, A. Bethencourt, J. Sliwka, L. Jaulin
ENSTA Bretagne
24 Octobre 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, peu coûteux et robustes, téléopération, autonomie, régulation, validation, localisation robuste, SLAM (Simultaneous Localization And Mapping), détection et reconnaissance d'objets, collaboration entre robots...

Voici les principaux travaux réalisés cette année :

- 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 ou tractés...) 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/transport de surface pour une meute de robots sous-marins...
- Robots sous-marins autonomes et concours SAUC-E 2012. Cette année, nous avons présenté 2 équipes : une première avec les AUVs SAUC'ISSE et SARDINE utilisés les années précédentes, et une deuxième, avec 2 (sur les 4 qu'on a) ROVs (Remote Operated Vehicles) de la société CISCREA achetés récemment et que l'on a transformés en AUVs (Autonomous Underwater Vehicles). 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.
- Projets étudiants : robot cerf-volant pour la récupération d'énergie, robot vélo autonome...

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. En plus des personnels de l'équipe robotique de l'ENSTA Bretagne, nous avons eu des étudiants, doctorants et stagiaires qui ont travaillé sur nos différents robots.

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, oxygène, 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 Iridium et les actionneurs nécessaires au contrôle de sa voile et du gouvernail : moteur pas-à-pas qui contrôle l'angle maximal d'ouverture de la voile et servomoteur qui contrôle l'angle

du gouvernail. De plus, une balise SPOT, un déflecteur radar, une lumière clignotante et un émetteur VHF sont parfois installés pour minimiser les risques de perdre le robot.

Son but est de remplacer/assister les navires océanographiques, bouées fixes et dérivantes ou instruments tractés 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, mobilisation exclusive du navire océanographique pour les instruments tractés... Un voilier autonome a plusieurs avantages :

- Autonomie énergétique : 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 et instruments tractés). Il suffit de lui programmer un trajet prédéfini et de le lancer 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 point de départ.
- 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

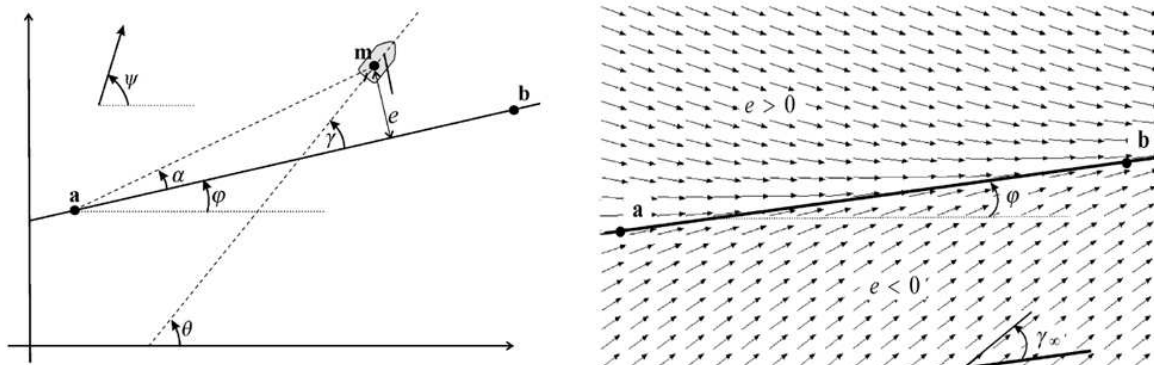
En plus des missions océanographiques, ce type de robot peut avoir d'autres utilités :

- 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 (il faut alors les faire plus grands).
 - 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).

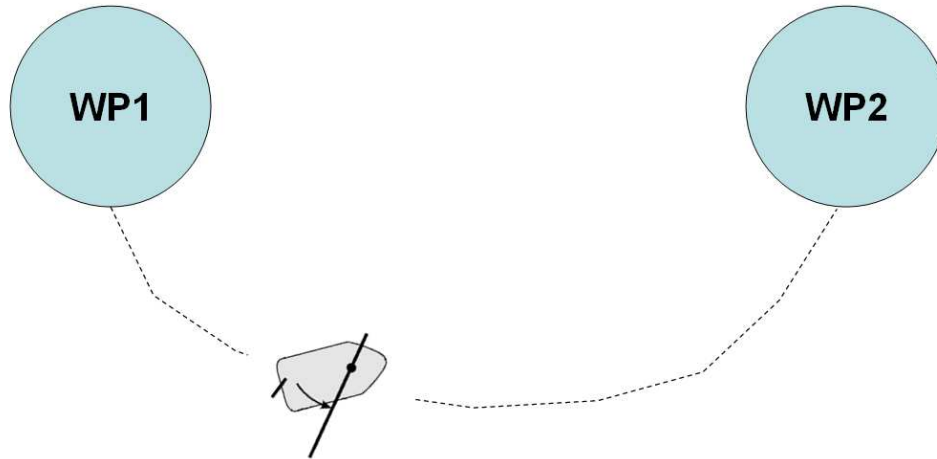


Figure 4 : Trajectoire typique d'un voilier ne faisant qu'un suivi de waypoint de base en réglant seulement son cap vers le waypoint cible en vent de travers ou arrière

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.

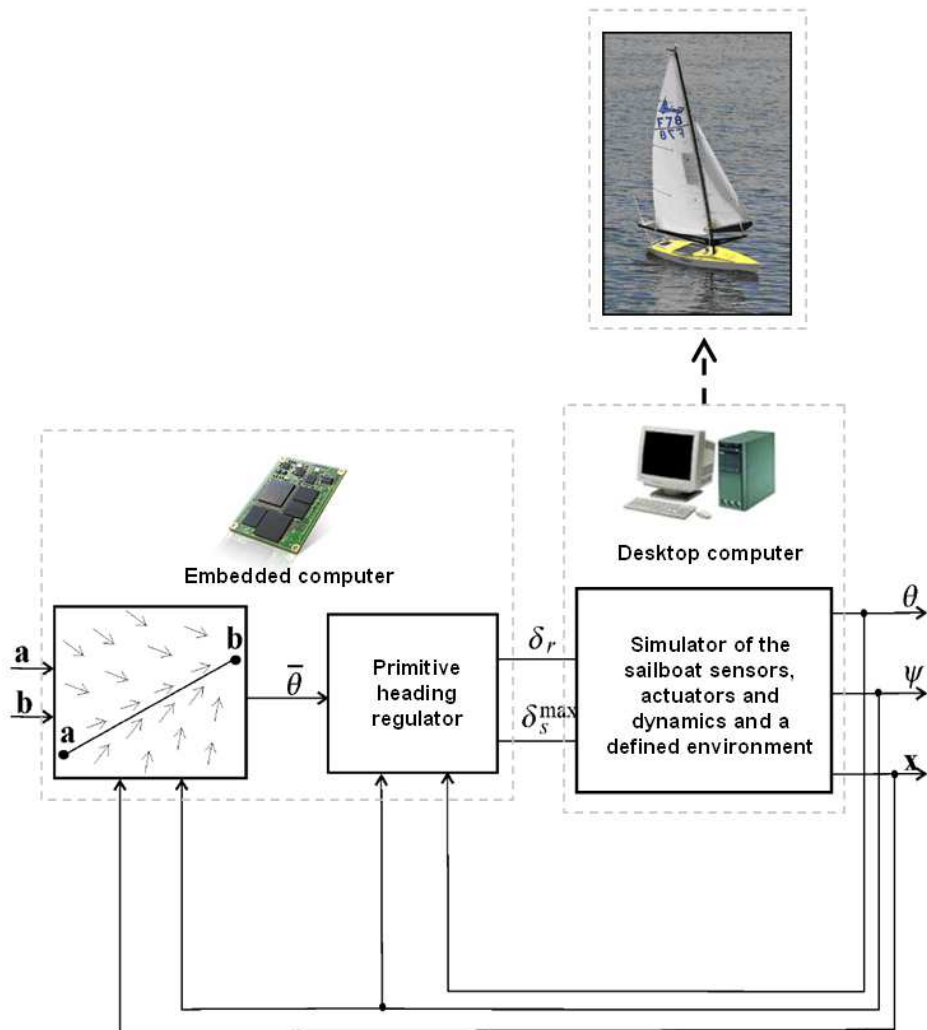


Figure 5 : Principe du simulateur HIL (Hardware In the Loop) utilisé pour tester et valider les algorithmes et actionneurs du robot, ainsi que planifier les missions réelles

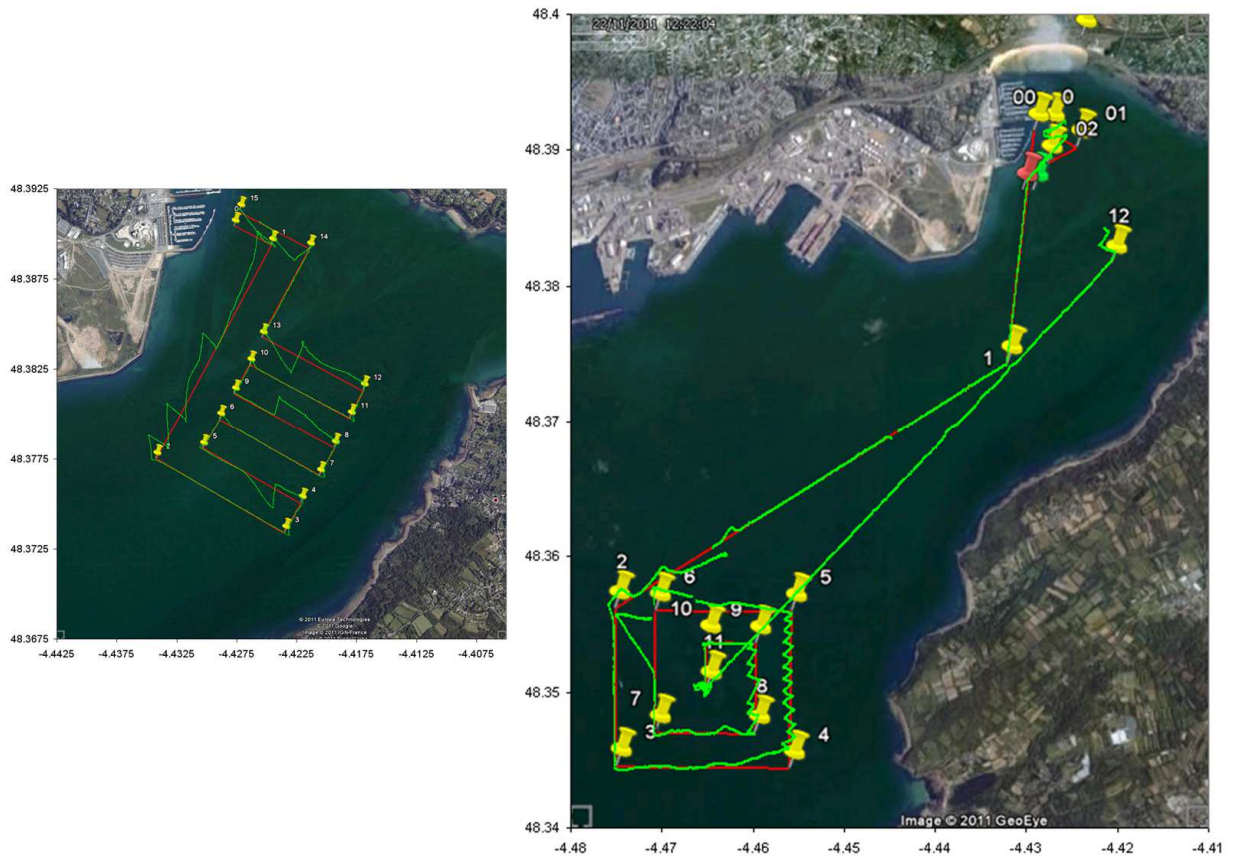


Figure 6 : Expériences faites dans la rade de Brest avec le voilier VAIMOS : le trajet prévu est indiqué par les lignes rouges (formées par les waypoints jaunes), le trajet réellement effectué est en vert. On voit parfois des sortes de zigzags autour de la ligne voulue : ceux-ci sont dus aux manœuvres 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.

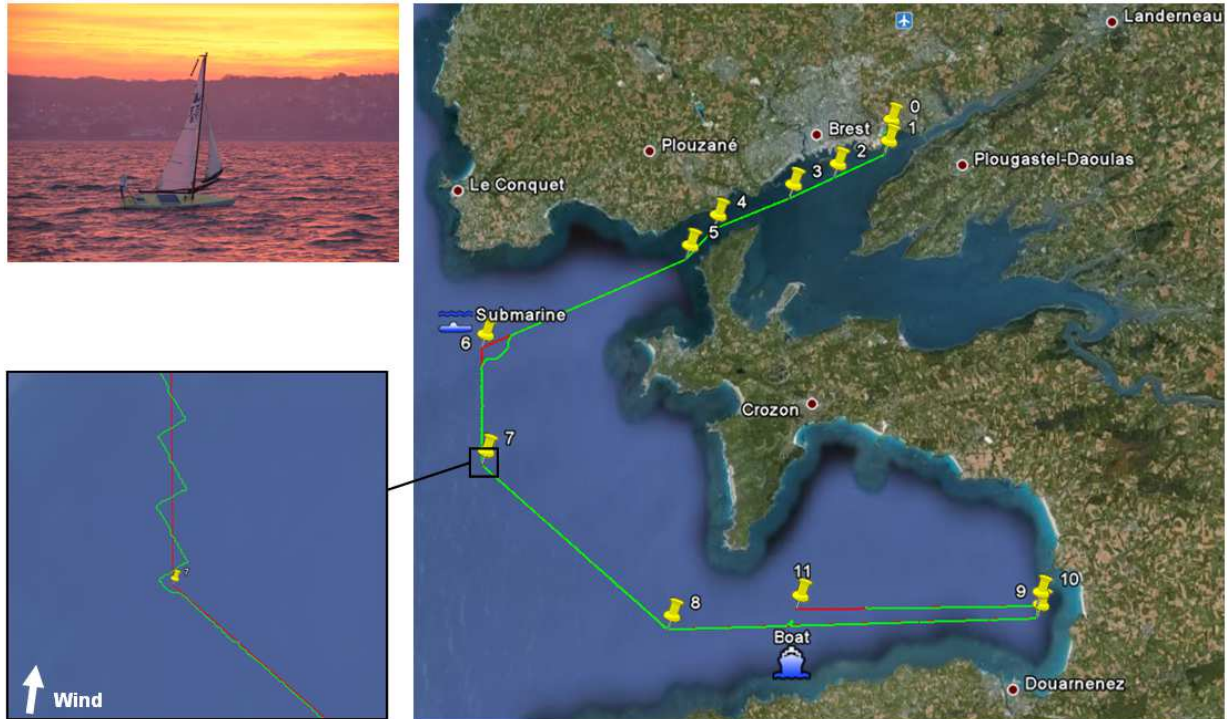


Figure 7 : Trajectoire Brest-Douarnenez voulue (lignes rouges formées par les waypoints jaunes) et effectuée (vert). Photo du voilier au départ le matin dans la rade de Brest et détail d'un passage de stratégie en remontée au près à une stratégie de suivi direct de la ligne, décidé par le robot. Le voilier 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

Suite aux essais concluants de VAIMOS entre Brest et Douarnenez, Quelques modifications ont été effectuées par l'Ifremer sur le voilier :

- Le gouvernail a été changé et renforcé.
- La voile a été refaite pour être plus adaptée à des conditions de vents forts.
- Un modem Iridium a été installé pour permettre le contrôle à distance du voilier par liaison satellitaire, ainsi que la récupération en cours de mission d'échantillons de données.
- Des modifications électroniques ont été apportées pour permettre des désactivations de certaines parties temporairement inutilisées sur le voilier pendant certaines étapes de ces missions.

Les algorithmes de contrôle du voilier ont été mis à jour pour prendre en compte ces différentes modifications. De plus, suite aux analyses du comportement du voilier lors de la mission Brest-Douarnenez, des améliorations ont été apportées à son algorithme de suivi de ligne. D'autres expériences en rade de Brest ont été ensuite faites pour tester et valider ces diverses modifications.

Enfin, du 15 Août au 15 Septembre, VAIMOS a été embarqué sur le navire océanographique Thalassa de l'Ifremer pour une mission au milieu de l'Atlantique (STRASSE), où il a été lancé pour plusieurs trajets de quelques jours dans le but d'enregistrer des données sur l'état de la surface de la mer dans cette zone, qui a été assez peu étudiée jusqu'à maintenant.



Figure 8: VAIMOS et le Thalassa.

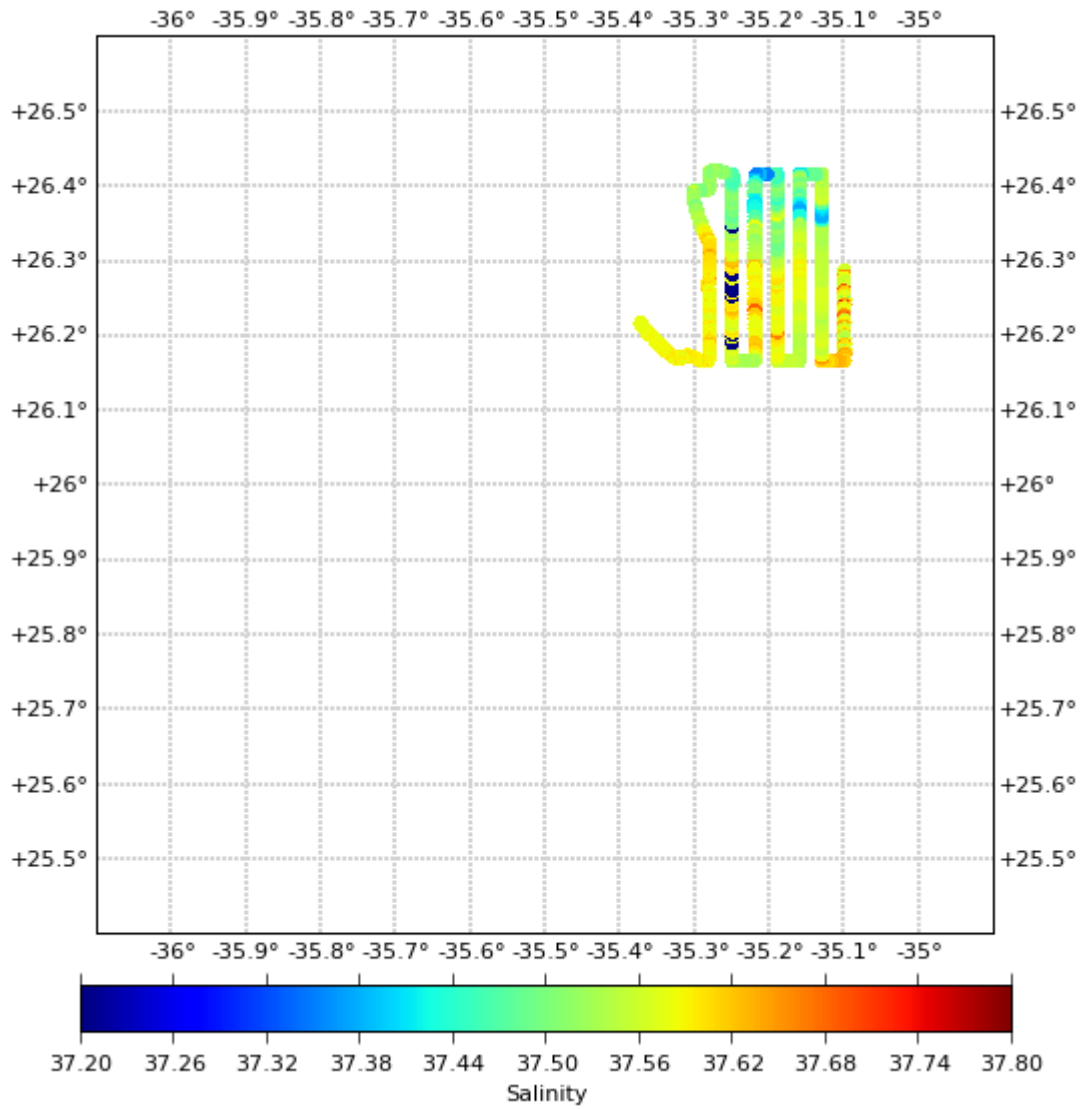


Figure 9: Salinité mesurée sur la zone quadrillée du entre le 21 et 24 Août 2012. Le vent était de direction variable et de vitesse de 1 à 15 nœuds. Un problème de gouvernail s'est produit vers la fin, mais n'a pas eu d'incidence sur les mesures océanographique car le voilier a pu se maintenir dans la zone d'intérêt.

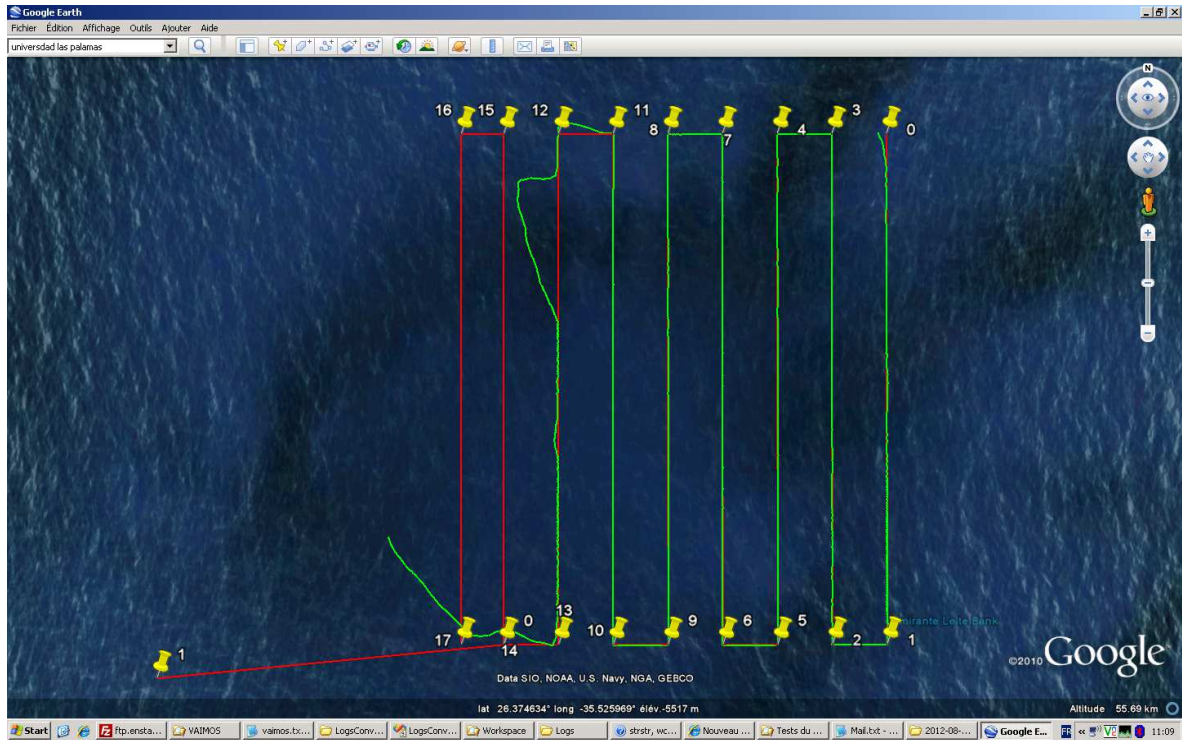


Figure 10: Trajectoire de VAIMOS lors de sa première longue sortie durant STRASSE, du 21 au 24 Août.2012. En vert, trajectoire du robot à partir de ses positions GPS, en rouge la trajectoire voulue.

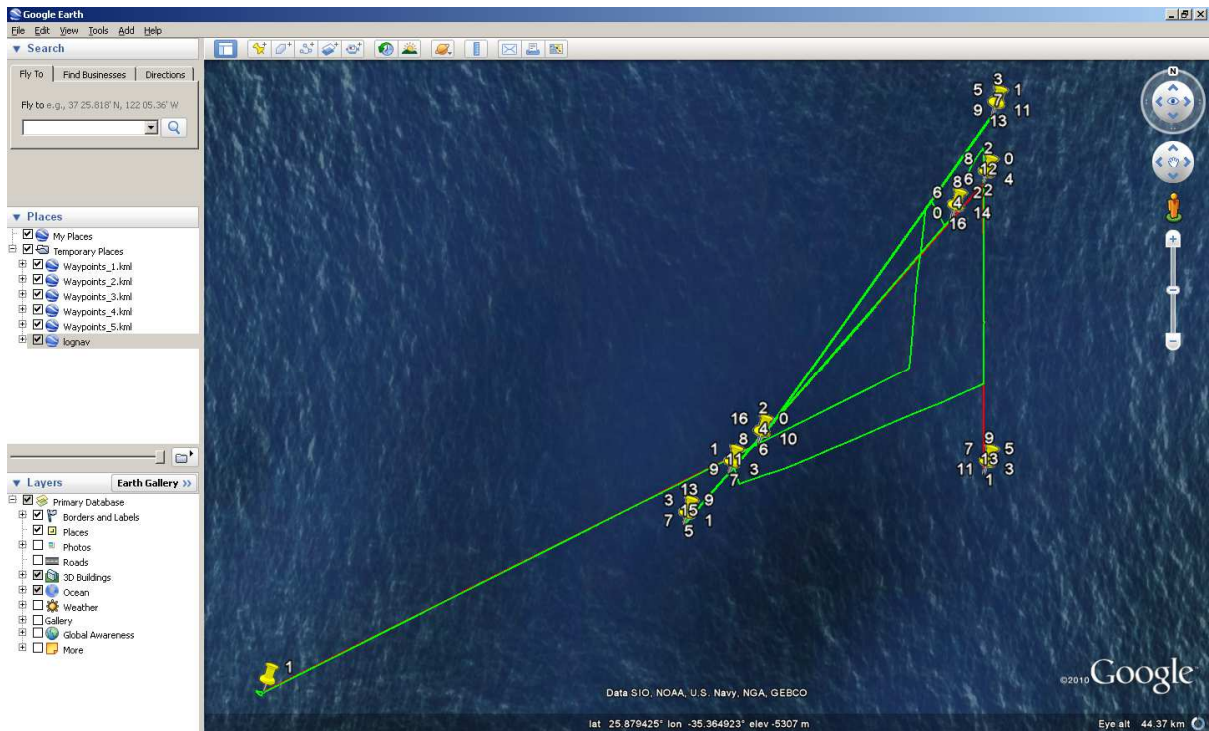


Figure 11: Trajectoire de VAIMOS lors de sa plus longue sortie durant STRASSE, du 27 au 30 Août 2012, avec une distance parcourue de 480 km (260 nm) en 73 h. En vert, trajectoire du robot à partir de ses positions GPS, en rouge la trajectoire voulue.

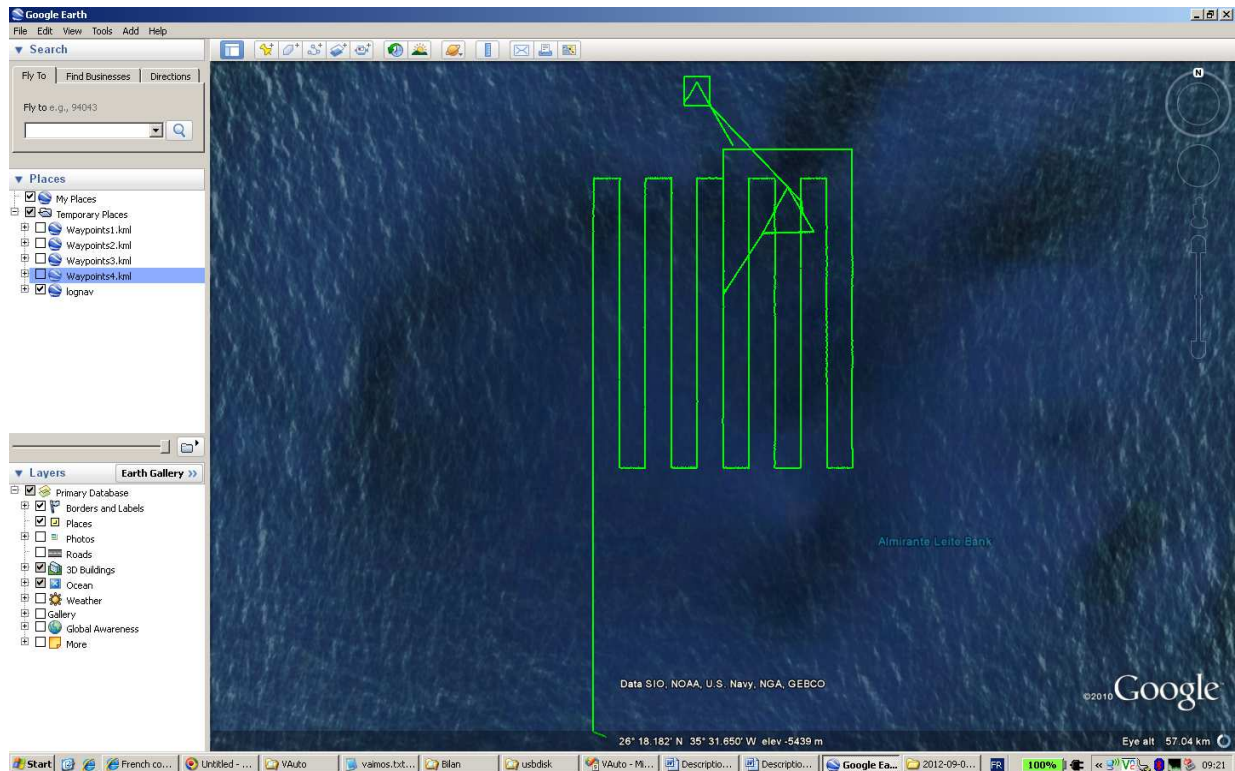


Figure 12: Quadrillage de zone et attentes en zones de station effectués du 6 au 9 Septembre 2012.

Au total, au cours de ses 6 principales sorties et plus de 1000 km parcourus, VAIMOS a permis de récupérer plus de 70 h de mesures lors de cette mission océanographique en condition d'utilisation réelles.

Robotique sous-marine : SAUC-E

Cette année, l'ENSTA Bretagne a présenté 2 équipes au concours de robots sous-marins autonomes SAUC-E 2012 à La Spezia, Italie du 6 au 13 Juillet 2012 (<http://www.sauc-europe.org>):

- Equipe 1 SAUC'ISSE et SARDINE : les 2 robots sous-marins existants, voir la video de présentation sur YouTube : <http://youtu.be/0xrXhngPo-A>



Figure 13 : SAUC'ISSE et SARDINE



Figure 14 : Equipe 1 SAUC'ISSE et SARDINE de l'ENSTA Bretagne pour SAUC'E 2012 avec le sous-marin SAUC'ISSE

- Equipe 2 CISSAU (CIScrea Sauc-e AUV's) : nouveaux ROVs CISCREA achetés par l'école l'année dernière et modifiés pour pouvoir fonctionner en mode AUV pour réaliser les missions du concours de manière autonome, voir la video de présentation sur YouTube : <http://youtu.be/QFnKeopSZ1I>

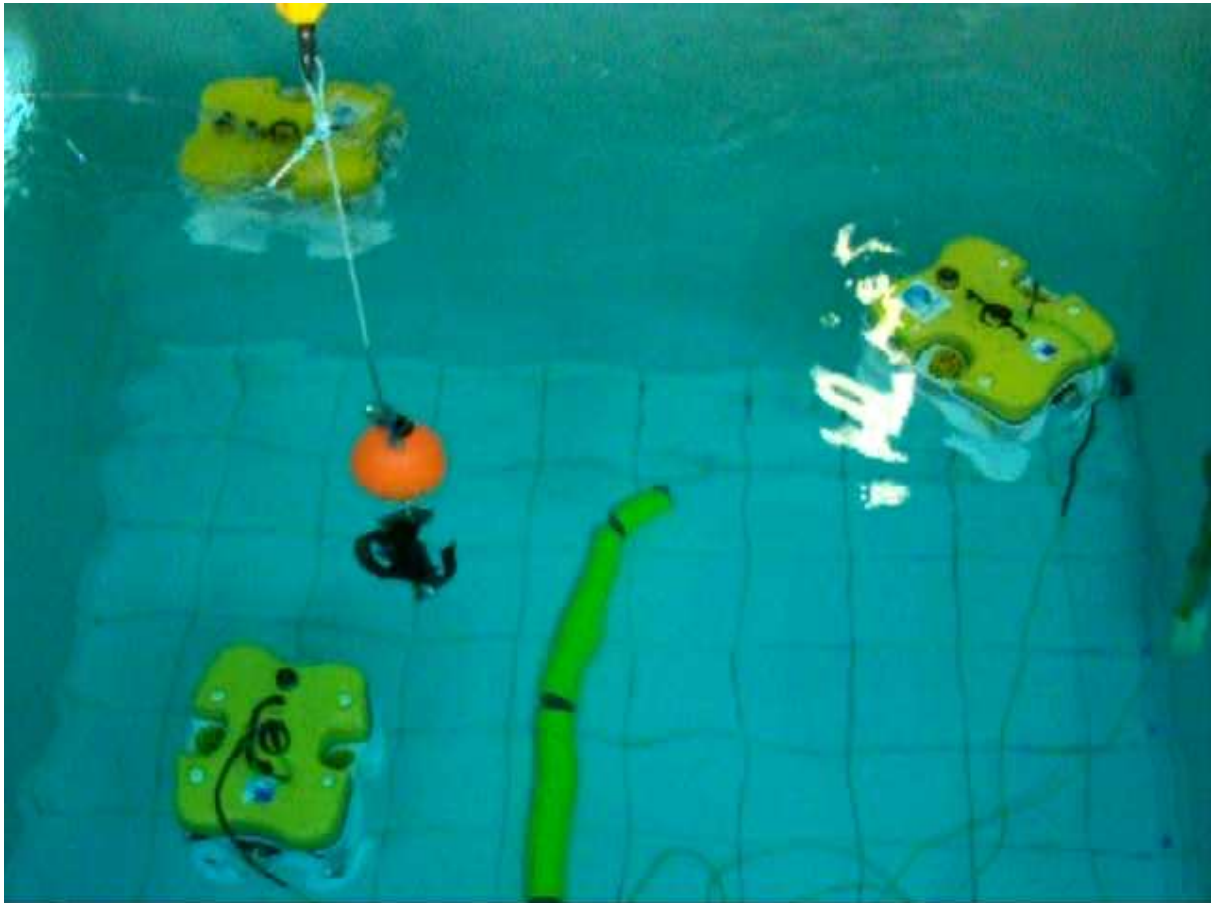


Figure 15 : Robots CISCREA en tests d'évitement d'obstacles dans la piscine de l'ENSTA Bretagne

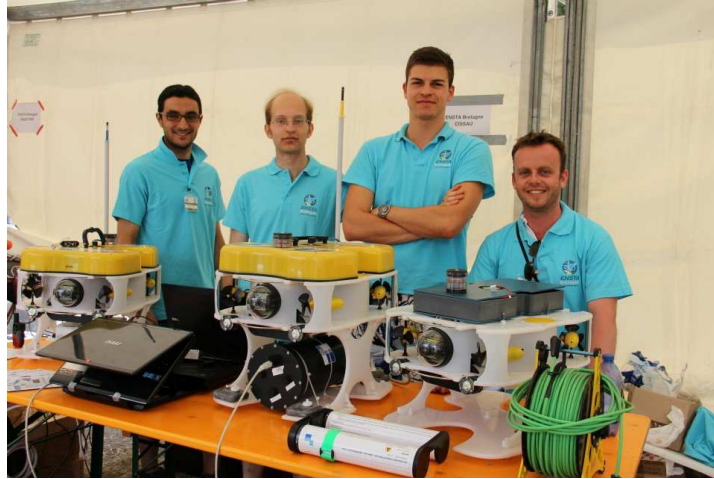


Figure 16 : Equipe 2 CISSAU de l'ENSTA Bretagne pour SAUC'E 2012 avec les sous-marins VENI, VEDI et VICI

Les épreuves étaient proches de celles de 2011, avec en plus des épreuves libres et de collaboration par communication acoustique entre robots.

L'équipe SAUC'ISSE et SARDINE a remporté la 3^{ème} place sur 14 équipes, les gagnants étant l'équipe canadienne de l'Ecole de Technologie Supérieure du Québec (gagnants du concours ROBOSUB 2011 à San Diego) et les 2^{èmes} l'Université de Luebeck (gagnants du concours SAUC-E 2011). L'équipe CISSAU a remporté le 2^{ème} prix "Impress the judges" pour leur démonstration de fonctionnement de meute avec plusieurs robots sous-marins.

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.

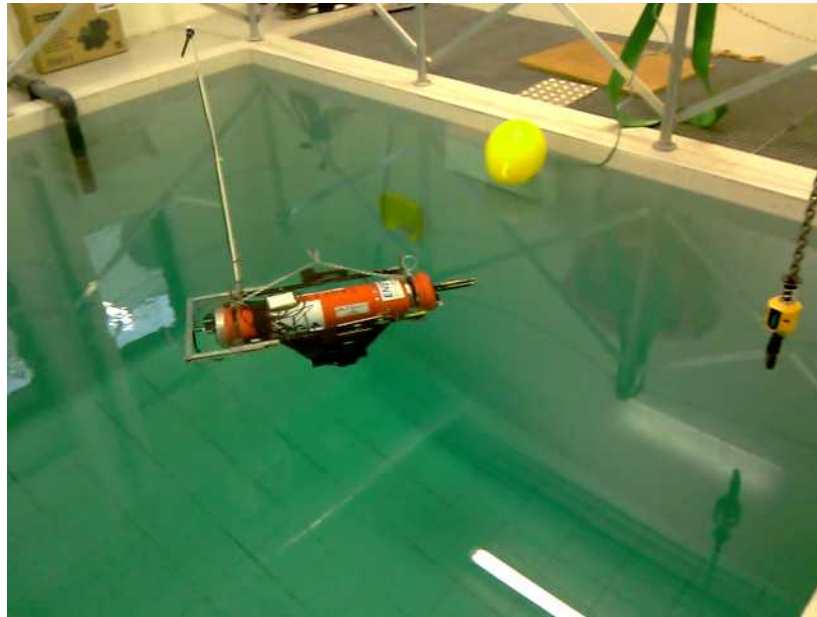


Figure 17: Localisation dynamique avec données aberrantes avec l'approche des accumulateurs intervalles, avec un échosondeur à la place du sonar habituel Ici, le sous-marin SAUC'ISSE effectue des allers-retours de manière autonome (2 waypoints dans la piscine ont été fixés) dans la piscine de l'ENSTA Bretagne (rectangulaire, de dimensions 3m*4m*3m)

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).

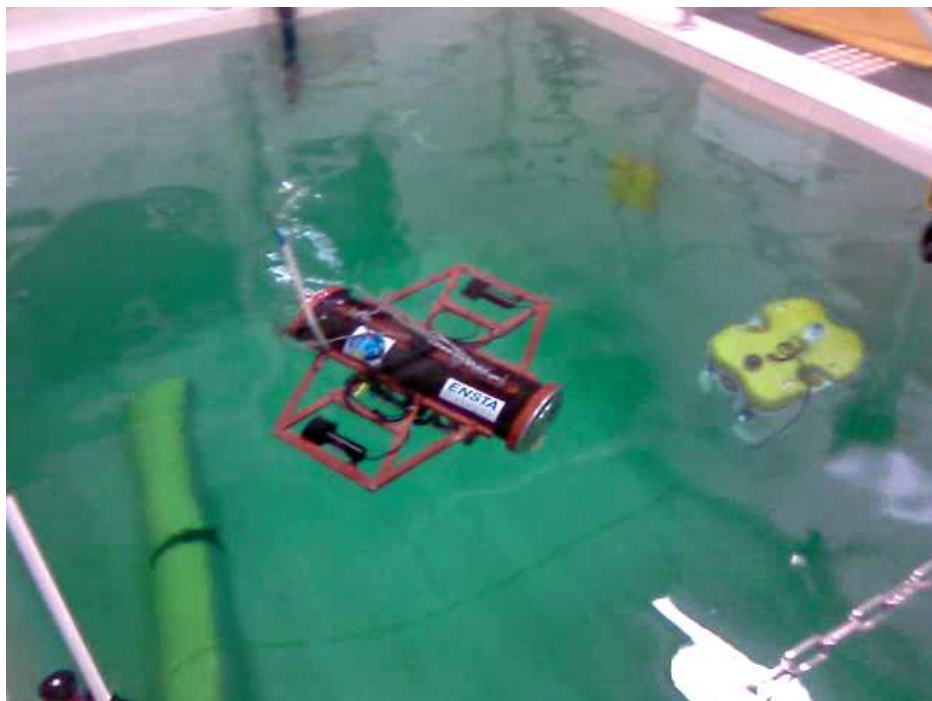


Figure 18 : SARDINE et un AUV CISCREA faisant des tests de régulations dans la piscine de l'ENSTA Bretagne

De plus, des expériences avec un pinger acoustique dans la rade de Brest et SAUC'ISSE muni de 2 hydrophones ont été faites. Différents types de données ont été

enregistrés pour pouvoir tester divers algorithmes par la suite. Ces tests sont notamment en lien avec les algorithmes de localisation utilisés sur le glider de l'ENSTA Bretagne.

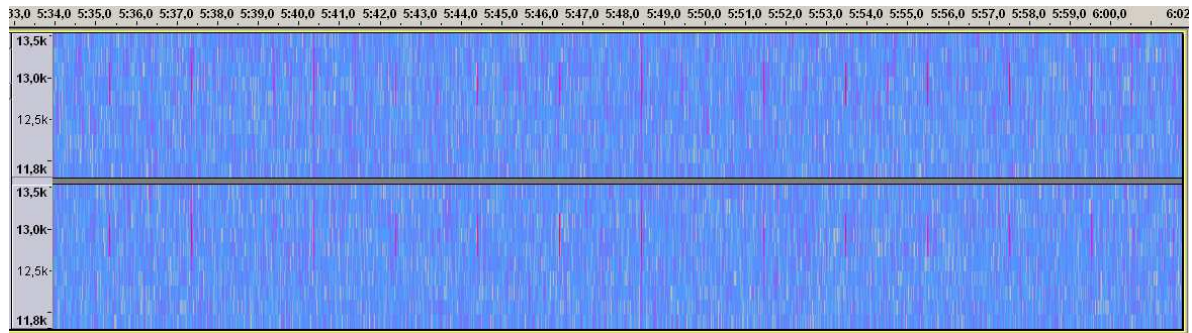


Figure 19 : Extrait des enregistrements audio des hydrophones. On voit des tâches rouges régulières : elles correspondent aux émissions du pinger à 13 KHz pendant 10 ms toutes les secondes

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).

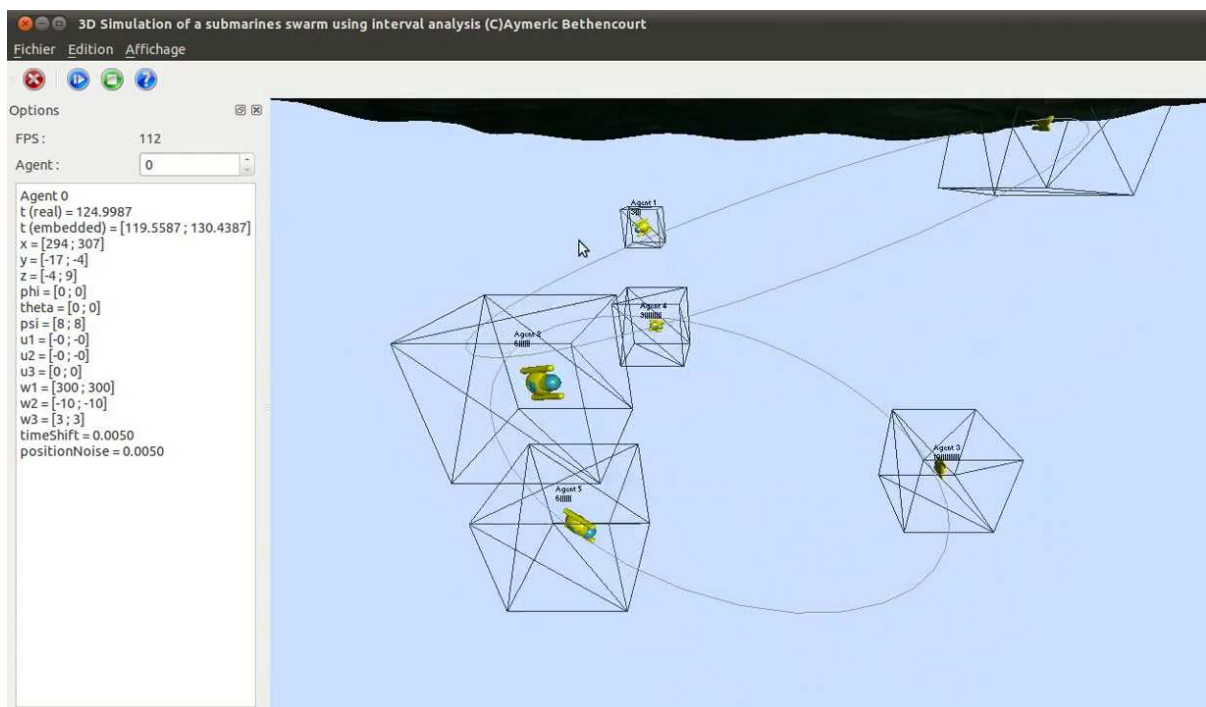


Figure 20: Simulateur de meute de robots sous-marins communiquant par acoustique lorsqu'ils sont à proximité pour améliorer leur localisation

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

Robotique terrestre : Coupe de France de Robotique

L'ENSTA Bretagne a participé à la Coupe de France de Robotique 2012. Le thème de ce concours cette année était « L'Ile au trésor ». 2 équipes s'affrontaient sur une table de 2 m * 3m, avec un palmier au centre et 2 totems. Des lingots (en bois) et pièces (CD) étaient à récupérer par les robots sur les totems, et à ramener sur le bateau de son équipe (zones marron rectangulaires) en un temps limité. Les robots devaient aussi 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 ». Les robots devaient être totalement autonomes et étaient donc équipés de capteurs tels que centrale inertielle et télémètres laser afin de connaître l'environnement dans lequel ils évoluaient.

Un algorithme de localisation précis et efficace peut aider grandement et même suffire à faire certaines épreuves. Pour cela, la méthode AMCL (Affine Monte-Carlo Localization) a été implémentée à partir de l'algorithme de Sebastian Thrun présenté dans le livre *Probabilistic Robotics*. Des études ont été menées afin d'implémenter et de comparer les résultats à une méthode ensembliste (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) en opposition à AMCL qui est une méthode probabiliste. Nous avons implémenté ces algorithmes sous ROS (Robot Operating System), une plateforme logicielle dédiée à la robotique et assez utilisée pour ce type de compétition

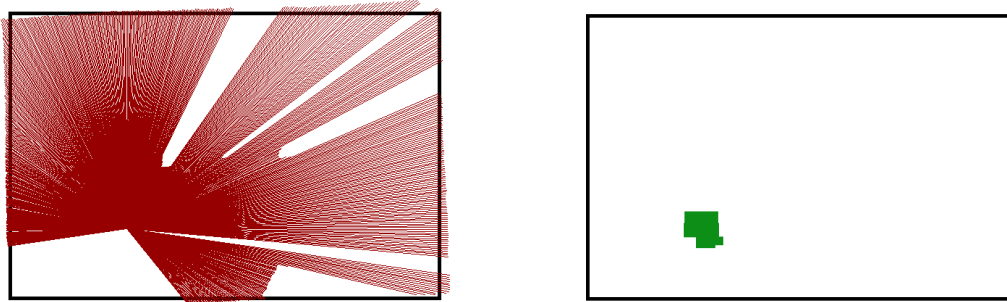
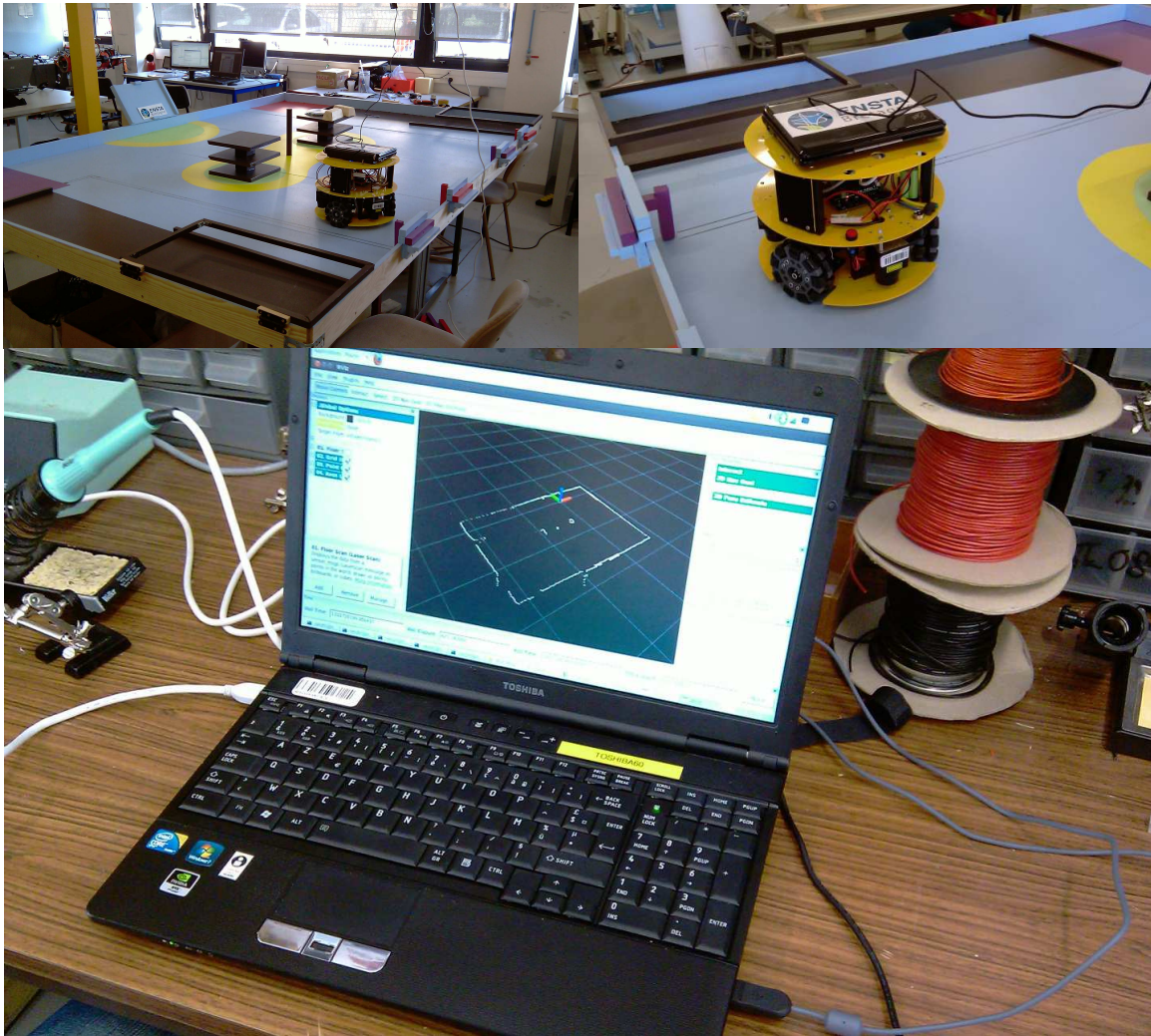


Figure 21: Réplication de la table de compétition avec l'un des robots préparé à l'école, localisation du robot avec les algorithmes de ROS (sur le PC portable) et résultats de l'algorithme de localisation ensembliste en bas avec en rouge les distances aux bords de la tables mesurées par les télémètres laser du robot et en vert la position estimée

Les résultats sur la localisation furent très bons et le robot a pu se localiser en temps réel avec seulement quelques centimètres d'erreur. Cependant la génération des commandes moteurs (avec gestion de l'évitement des robots adverses) fut plus mitigée. L'école est arrivé finalement 90^{ème} sur 175 au concours, devant l'ENSTA ParisTech.

COUPE DE FRANCE DE ROBOTIQUE EQUIPE ENSTA-BRETAGNE



JOFFREY
CARDON

VICTOR
PERINET

LOUIS
LEVEUF

BENOIT
DESROCHERS

PATRICK
ARNAUDIN

ARMAND
BOURQUIN

AYMERIC
BETHENCOURT

JEAN-FRANCOIS
BERTIN

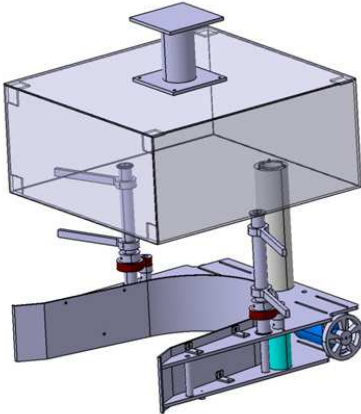
ANTOINE
LE COGUE

ADRIEN
DESIES

JEAN-BAPTISTE
ROGER

LUC
JAULIN

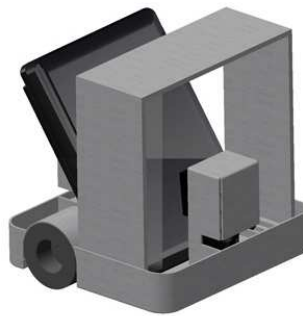
 NATIONALITÉ FRANÇAISE



ROBOT PRINCIPAL

- ORDINATEUR EMBARQUE EEE-PC
- 1 TELEMETRE LASER HOKUYO
- 1 IMU CH-ROBOTICS

MISSIONS : LINGOS / PIECES
DES BRAS ROTATIFS RABATENT LES
PIECES ET LINGOTS DANS LA CAVITE
DU ROBOT.



ROBOT SECONDAIRE

- ORDINATEUR EMBARQUE EEE-PC
- 2 TELEMETRES LASER HOKUYO

MISSIONS : CARTE / BOUTELLES
ROBOT LEGER ET RAPIDE VISANT
A REMPLIR RAPIDEMENT LES
OBJECTIFS PUIS A BLOQUER L'ACCES
DU NAVIRE A L'ENNEMI.



ROBOT DE SECOURS

- ORDINATEUR EMBARQUE EEE-PC
- 3 TELEMETRES LASER HOKUYO
- 1 IMU CH-ROBOTICS
- 1 CARTE ARDUINO

MISSIONS : TOUTES
ROBOT OMNI-DIRECTIONNEL CAPABLE
DE REMPLACER LE ROBOT 1 OU 2 EN
CAS DE PANNE.

