

Construction d'un robot sous-marin pour le concours SAUC-E

Rapport d'avancement T0+12 mois (convention MRIS 2009-2010)

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

ENSIETA

3 Décembre 2010

Descriptif de l'étude

Dans le cadre de cette étude, nous cherchons à réaliser des plateformes robotiques sous-marines dans le but de valider des concepts/algorithmes divers. Les thématiques liées à ce projet sont variées : réalisation d'une mécanique simple et robuste, télé-opération, autonomie, localisation et cartographie, détection et reconnaissance d'objets, collaboration entre robots...

Comme tous les ans, nous avons participé au concours SAUC-E (Student Autonomous Underwater Challenge - Europe), qui a eu lieu cette année du 28 Juin au 4 Juillet à La Spezia en Italie (voir Figure 1). La particularité du concours de cette année est qu'il se déroulait pour la 1^{ère} fois en mer, dans une marina. Nous avons terminé 3^{ème} sur 9 équipes, les 1^{ers} étant l'Université de Girona (Espagne) et les 2^{èmes} l'Université d'Heriot-Watt (Ecosse).



Figure 1 : L'équipe de l'ENSIETA pour SAUC'E 2010 avec les sous-marins SAUC'ISSE et SARDINE

Déroulement de l'année

Cette année, il y a eu un grand essor des activités robotiques à l'ENSIETA. Le club robotique de l'ENSIETA développe désormais des robots sous-marins, voiliers, terrestres et aériens. Nous avons donc pu attirer plusieurs personnes pour développer des algorithmes et nous aider à la conception des robots sous-marins.

L'année a comme d'habitude commencé par une présentation et une prise en main du robot par les élèves intéressés par le projet à partir du mois d'Octobre. Des « cours » et des « TD » d'initiation liés aux parties importantes du robot ont été organisés par des doctorants anciens élèves de l'école ayant participé aux concours des années précédentes 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...

Un étudiant en 3^{ième} année, 2 étudiants en 2^{ième} année, 2 stagiaires étrangers, un étudiant en 1^{ère} année, un autre de 2^{ème} année et 2 doctorants ainsi qu'un enseignant et une industrielle ont travaillé ou collaboré sur ce projet.

Construction du robot-caméra

Le but de cette nouvelle plateforme était de filmer le robot actuel pendant qu'il effectue ses missions. Le robot devait aussi servir de remplacement dans le cas d'un problème sur la plateforme originale. Dans le futur nous comptons faire collaborer les 2 plateformes robotiques et à terme faire une meute de sous-marins qui collaborent. La plateforme, nommée SARDINE, reprend les grands principes de l'ancien (tube de taille similaire, même propulsion...) avec quelques nouveautés : caméra intérieure voyant à travers une fenêtre sur la tôle avant, EeePC à la place du PC/104...

2 étudiants de 2^{ième} année et un stagiaire ont travaillé sur ce projet.

Mise à jour du robot existant

La principale modification a été la réorganisation des connecteurs étanches sur la tôle arrière (Figure 2). Celle-ci a été refaite entièrement pour qu'elle prenne tous les connecteurs extérieurs et qu'on puisse rajouter facilement de nouveaux périphériques externes. En conséquence, la tôle avant du sous-marin n'a maintenant plus aucun connecteur branché dessus : on peut alors rapidement l'ouvrir pour remplacer les batteries du sous-marin. La tôle arrière n'a plus à être ouverte, sauf pour des opérations de maintenance.

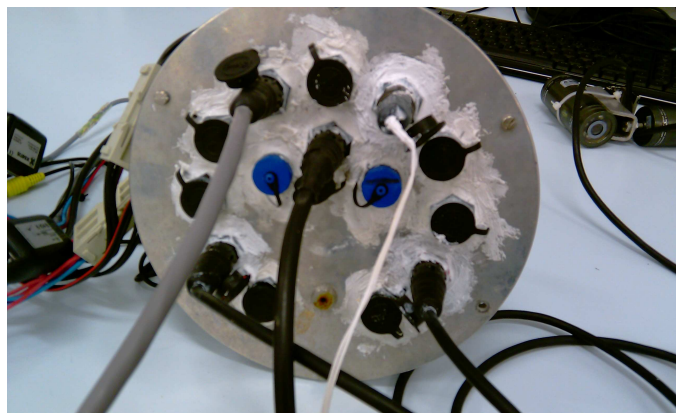


Figure 2 : Nouvelle tôle arrière de SAUC'ISSE

Modélisation informatique

Un étudiant de 3^{ème} année a effectué une étude complète sur la modélisation de l'architecture logicielle du robot.

Communication

Les ondes électromagnétiques se propagent difficilement sous l'eau, dès que le robot plonge, nous perdons toute possibilité de contact. Un stagiaire a donc travaillé sur un prototype de communication acoustique à bas coût. Le but était de pouvoir à la fois téléopérer le robot et remonter certaines informations sur son état comme sa position et l'identifiant de la mission qu'il est en train d'effectuer. Une étude sur la téléopération du robot par voix humaine a également été faite mais l'idée a été abandonnée.

Vision et collaboration

L'autre stagiaire a commencé à développer un algorithme de traitement d'image. Le but de l'algorithme était de refaire une trajectoire donnée en mode autonome en se basant sur une vidéo prise par le robot lors du parcours de cette trajectoire en mode téléopéré. L'algorithme a commencé à être testé sur SARDINE.

Localisation et autres

Les doctorants se sont occupés de l'algorithme de localisation (Figure 3) et des parties critiques des robots.

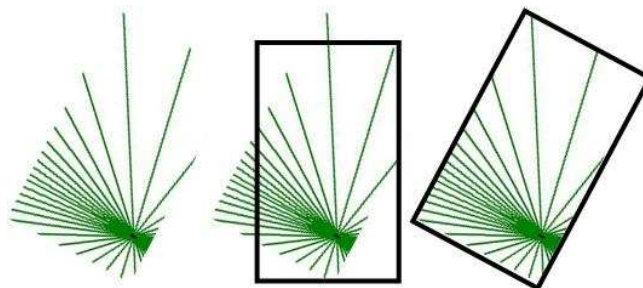


Figure 3 : Illustration de l'algorithme de localisation

Nous avons pu nous rendre compte que l'utilisation de la centrale inertielle et de temporisations pour effectuer un trajet prédéfini était efficace. Nous avons donc aussi utilisé ces données pour localiser le robot. Des tests simples de temps de parcours et d'accélération selon les commandes envoyées aux propulseurs ont été faits pour mettre en place une méthode rapide (peu précise mais acceptable, simple à programmer et peu coûteuse en temps de calcul) de localisation et de suivi de points de passages prédéfinis.

Description des robots sous-marins

Architecture extérieure

Nos 2 robots sous-marins sont fabriqués suivant le même principe (Figure 4). En effet, un tube en aluminium est pratique pour sa résistance à la pression ou la corrosion, son amagnétisme... Le tube constituant la base mécanique des 2 sous-marins fait 70 cm, ce qui est à la fois suffisant pour contenir tous les périphériques intérieurs nécessaire et pratique pour faciliter le transport et réduire le poids. Le diamètre du tube du nouveau sous-marin est de 20 cm, pour pouvoir contenir un ordinateur de la classe des ultraportables (contrairement à SAUC'ISSE, qui a un tube de 17 cm de diamètre et contient un PC/104).

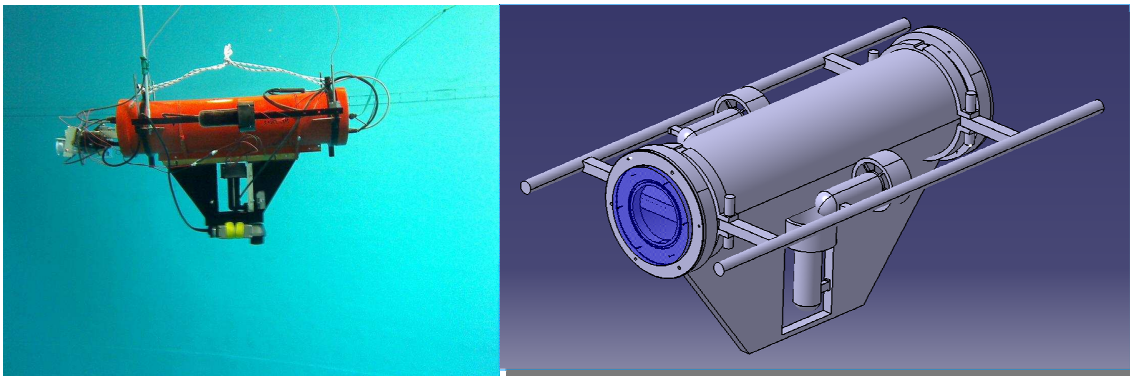


Figure 4 : SAUC'ISSE dans l'eau et SARDINE en simulation

L'étanchéité de chaque tube est réalisée par 2 tapes en aluminium munies de joints toriques et connecteurs étanches (Switchcraft EN3 et Bulgin Buccaneer) pour relier les différents actionneurs et capteurs extérieurs avec l'intérieur du tube (Figure 5). 3 vis de fixation par tape assurent leur maintien sur le tube et 3 vis d'extraction permettent de faciliter leur ouverture.

La tape avant de SARDINE a un hublot permettant l'utilisation d'une webcam directement à l'intérieur du tube. Tous les connecteurs étanches sont branchés sur la tape arrière. Cette dernière n'a besoin d'être ouverte que pour des opérations de maintenance car la tape avant permet de remplacer les batteries et de démarrer l'ultraportable. Ainsi, seule la tape avant, qui ne possède aucun connecteur, doit être ouverte en conditions normales d'utilisation. Le principe est le même pour SAUC'ISSE.



Figure 5: Tape arrière de SAUC'ISSE avec ses connecteurs (côté intérieur) et tape avant de SARDINE, avec un hublot

Une structure spéciale a été réalisée pour maintenir les propulseurs horizontaux (Figure 6).

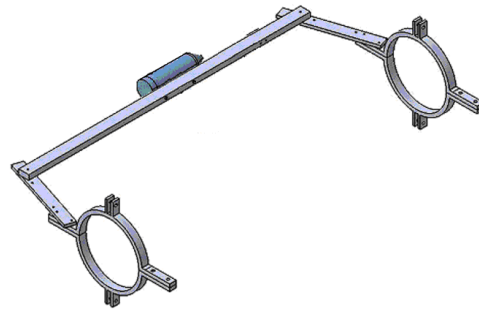


Figure 6: Structure supportant les propulseurs horizontaux de SAUC'ISSE

Le roulis et le tangage ne sont pas contrôlés car ils restent stables grâce à une quille lestée, qui sert aussi de support pour le sonar et le propulseur vertical (Figure 7). La quille est coupée au niveau du centre du sous-marin où se trouve le propulseur vertical. Seul SAUC'ISSE a un sonar au bout de sa quille.



Figure 7: Propulseur vertical centré dans la quille

L'équilibrage du sous-marin pour atteindre la limite de flottaison est ajusté en rajoutant des morceaux de plomb sur des tiges placées aux 4 coins du sous-marin. En conséquence, le propulseur vertical n'a besoin de produire qu'une force faible pour que le sous-marin descende en profondeur et lorsqu'il est éteint le robot remonte tout seul à la surface.

Organisation intérieure

Des rails collés à l'intérieur du tube en aluminium permettent de faire glisser une plaque de Plexiglas de 6 mm de large qui sert de support principal pour les éléments intérieurs de SAUC'ISSE (Figure 8).



Figure 8: Rails à l'intérieur du tube de SAUC'ISSE

Un tiroir monté sur la plaque contient les batteries (Figure 9). Ainsi, on peut facilement accéder aux batteries sans avoir besoin de déplacer les autres éléments, qui sont fixés à l'aide de scratchs sur la plaque de Plexiglas principale.

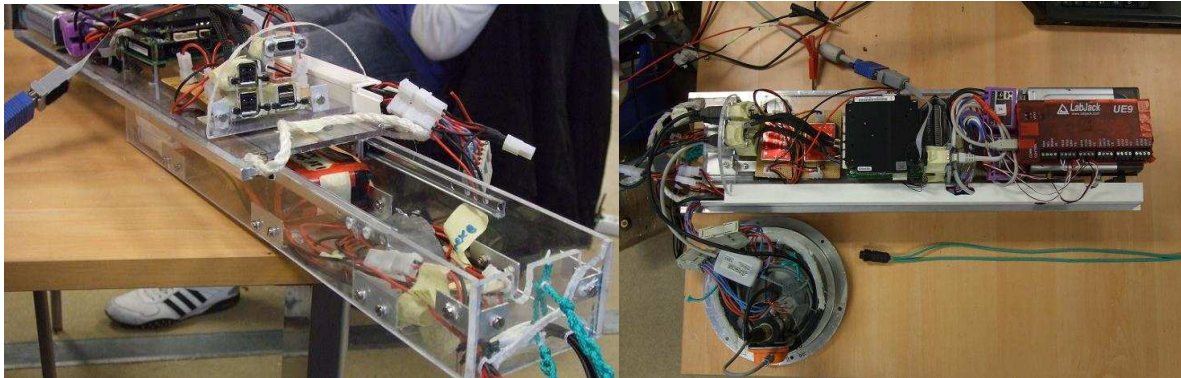


Figure 9: Tiroir et éléments internes de SAUC'ISSE

L'architecture intérieure de SARDINE est similaire (Figure 10).

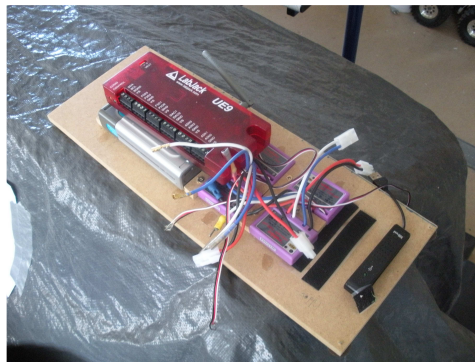


Figure 10: Plaque intérieure arrière de SARDINE

Partie électronique

Présentation générale

Les parties électroniques des 2 sous-marins sont très proches (Figure 11 et Figure 12).

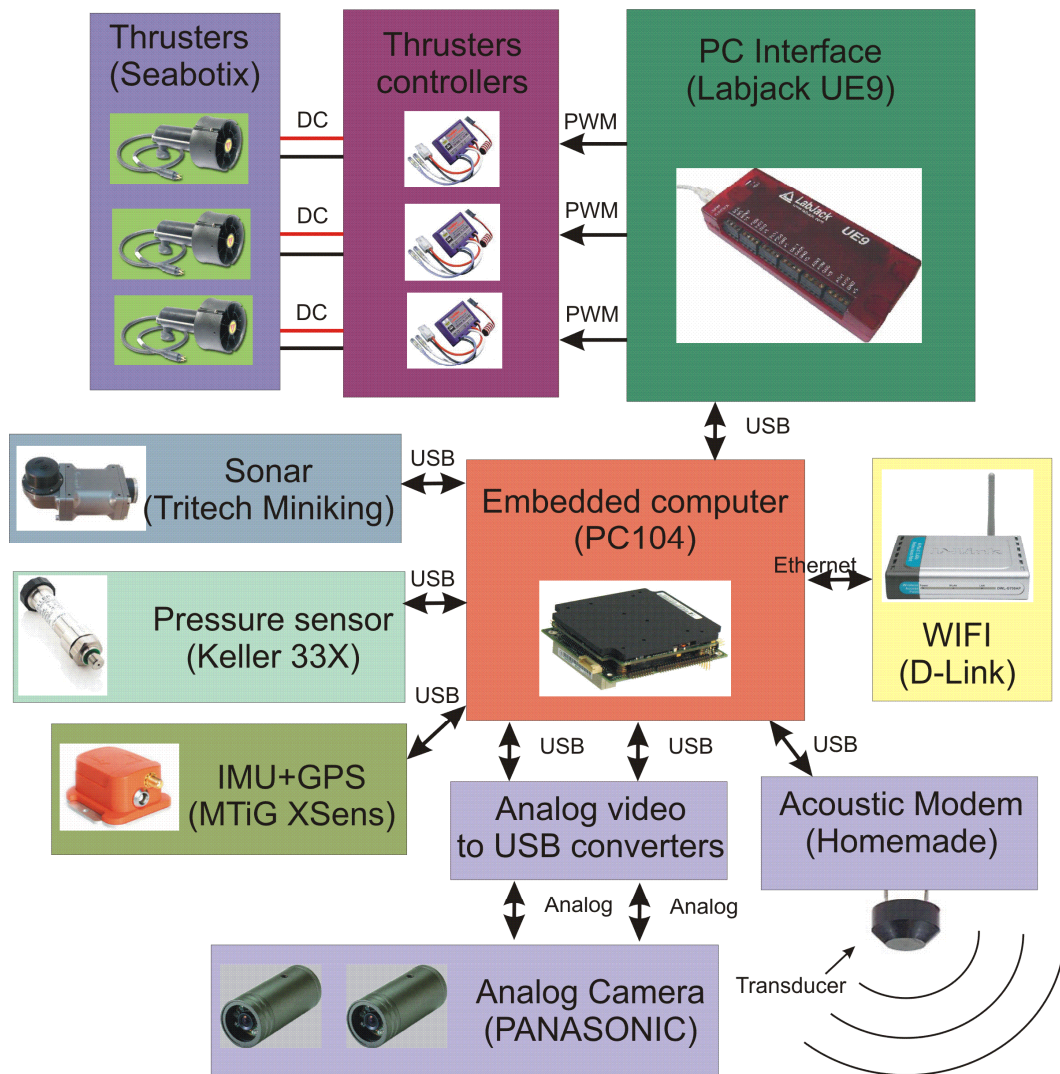


Figure 11: Architecture électronique de SAUC'ISSE

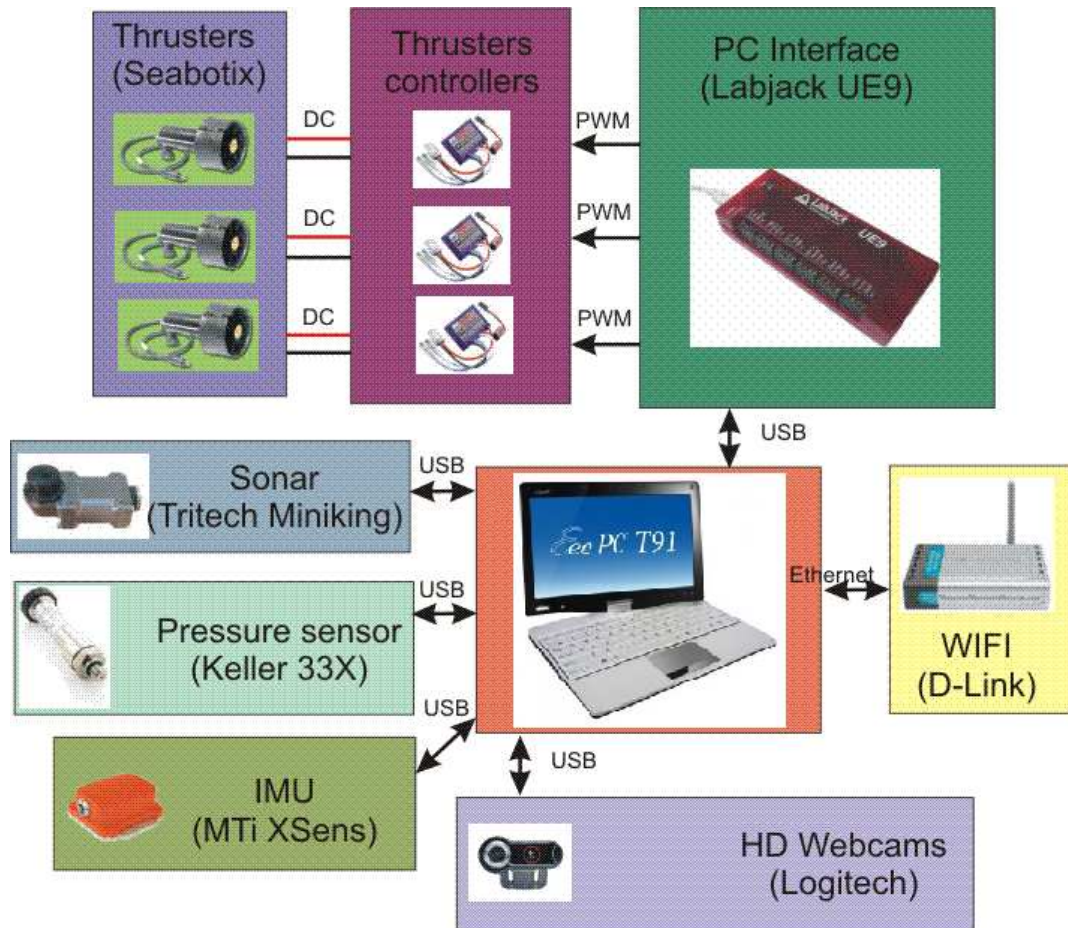


Figure 12: Architecture électronique de SARDINE

Contrôle des propulseurs

3 propulseurs DC BTD150 de SEABOTIX (Figure 13), un fabricant américain de ROVs (Remote Operated Vehicles) permettent au robot de se déplacer :

- 1 propulseur vertical ajuste la profondeur du véhicule
- 2 propulseurs horizontaux contrôlent la vitesse et la direction

Ces propulseurs sont étanches jusqu'à 150 m.



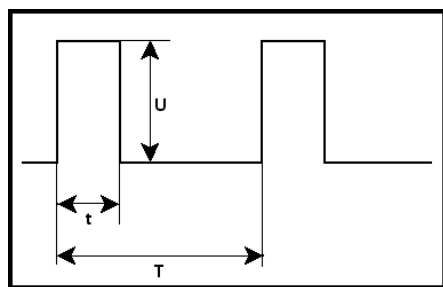
Figure 13: Propulseur SEABOTIX

Pour contrôler la vitesse des propulseurs à partir de signaux électroniques, nous utilisons des variateurs de modélisme Robbe Rokraft (Figure 14).

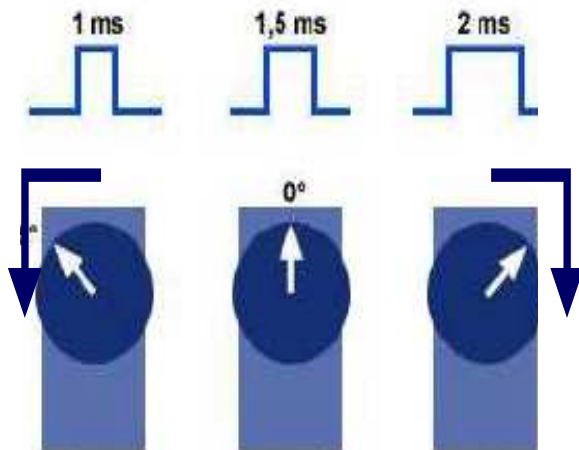


Figure 14: Variateur (ou carte de puissance)

La puissance envoyée au propulseurs (et donc leur vitesse) dépend de la forme du signal PWM (Pulse Width Modulation) que reçoivent les variateurs.



U : tension du signal PWM (5 V)
t : largeur d'impulsion (entre 1 et 2 ms)
T : période (20 ms)



Motor state	Pulse width
Motor stopped	1.5 ms
Turn in a direction	1.5 to 2.0 ms
Turn in the other direction	1.0 to 1.5 ms

Stopped

Figure 15: Signaux PWM

Pour générer ces signaux PWM à partir de programmes fonctionnant sur l'ordinateur embarqué, nous avons besoin d'un module d'interface entre l'ordinateur et le variateur : le Labjack UE9 (Figure 16). C'est un périphérique USB fournissant de nombreuses entrées-sorties pouvant être facilement connectées à divers périphériques électroniques.

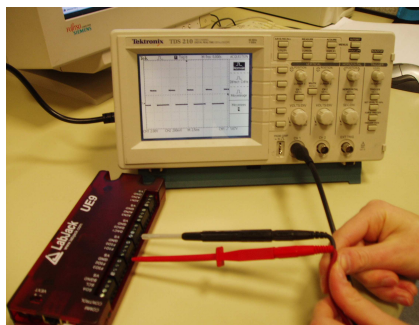


Figure 16: Labjack UE9 générant des signaux PWM

Ordinateurs embarqués

L'ordinateur embarqué dans SAUC'ISSE est un PC/104 d'EUROTECH avec un processeur Pentium M à 1.4 GHz et 512 Mo de RAM (Figure 17). Le système d'exploitation et les programmes sont stockés sur un disque dur 2.5 pouces de 320 Go. 8 ports USB, 1 port Ethernet, 2 ports RS232 et un port VGA permettent d'y connecter toutes sortes de périphériques et de communiquer avec l'ordinateur de manière classique.



Figure 17: PC/104 CPU-1482 d'EUROTECH

Il peut être directement alimenté à partir de batteries 12 ou 24 V grâce à un étage d'alimentation au format PC/104 qui fournit des tensions de +3.3, +5 et +12 V réglées (Figure 18).

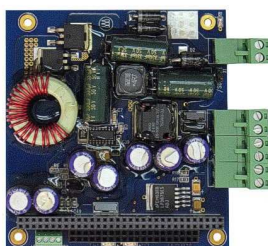


Figure 18: Etage d'alimentation du PC/104

L'ordinateur embarqué de SARDINE est un ultraportable ASUS EeePC T91 MT (Figure 19). Il est plus large qu'un PC/104 (il ne pouvait pas rentrer dans le tube de SAUC'ISSE) mais plus mince et possède une batterie intégrée lui donnant une autonomie énergétique proche de 6h (en pratique, avec les périphériques branchés dessus, et plusieurs programmes lancés, on peut l'utiliser pendant 2 à 3h dans le sous-marin) tout en ayant des caractéristiques techniques (CPU, RAM) très proches du PC/104 de SAUC'ISSE. Un hub USB est nécessaire pour connecter tous les périphériques dont nous avons besoin.



Figure 19: ASUS EeePC T91 MT

Capteurs

a) Caméras

SARDINE est munie d'une webcam standard Logitech Webcam Pro 9000 placée directement dans le tube, derrière le hublot à l'avant (Figure 20). Elle peut fournir des images de très haute résolution (jusqu'à 1600x1200 pixels et même plus avec ses algorithmes d'interpolation intégrés) et a un angle d'ouverture horizontale de 75°. De plus, certains défauts ou réglages habituels dans les images tels que les distorsions, la luminosité, le focus, le zoom... sont automatiquement gérés par son filtre intégré et sont aussi configurables grâce au logiciel fourni avec le driver sous Windows. Le microphone intégré pourrait aussi être utilisé pour mettre au point un système de commande vocale du sous-marin.



Figure 20: Webcam Logitech Webcam Pro 9000

Pour SAUC'ISSE, nous avons acheté des cameras analogiques étanches (jusqu'à 50 m) ALLWAN AL-2121 connectées au PC/104 via des connecteurs étanches (elles sont placées à l'extérieur du tube, une orientée vers l'avant et une autre orientée vers le bas) et des convertisseurs Grabbino audio-vidéo analogique vers USB (Figure 21).



Figure 21: Caméras étanches analogiques et convertisseur audio-vidéo analogique vers USB

b) Capteur de pression

Pour obtenir la profondeur des sous-marins, un capteur de pression Keller PAA33X connecté au PC embarqué via un convertisseur RS485 vers USB est fixé sur la tôle arrière de chacun des sous-marins (Figure 22).



Figure 22: Capteur de pression

c) Centrale inertielle

Une centrale inertielle Xsens MTi prêtée par le GESMA (Groupe d'Etudes Sous Marines de l'Atlantique) permet d'obtenir l'orientation de SAUC'ISSE par rapport au Nord de façon précise et robuste grâce à son filtre de fusion intégré qui utilise les magnétomètres (boussole 3D) et les gyroscopes (capteurs inertiels) pour fournir une orientation correcte même en cas de perturbations magnétiques (Figure 23). Elle est connectée au PC embarqué via un convertisseur RS422 vers USB. SARDINE a une MTi-G (comme la MTi, mais avec un GPS en plus et un convertisseur RS232 vers USB). Cette dernière semble moins précise que la MTi lorsque le GPS n'est pas disponible (ce qui est le cas lorsque le sous-marin plonge sous l'eau).



Figure 23: La MTi et la MTi-G

d) Sonar

Pour obtenir sa position par rapport aux bords de la zone où il évolue ou détecter des objets, SAUC'ISSE a un sonar Tritech MiniKing (prêté par d'autres personnes de notre école) connecté au PC embarqué de SAUC'ISSE en RS232 via un connecteur étanche (Figure 24 et Figure 25).



Figure 24: Sonar

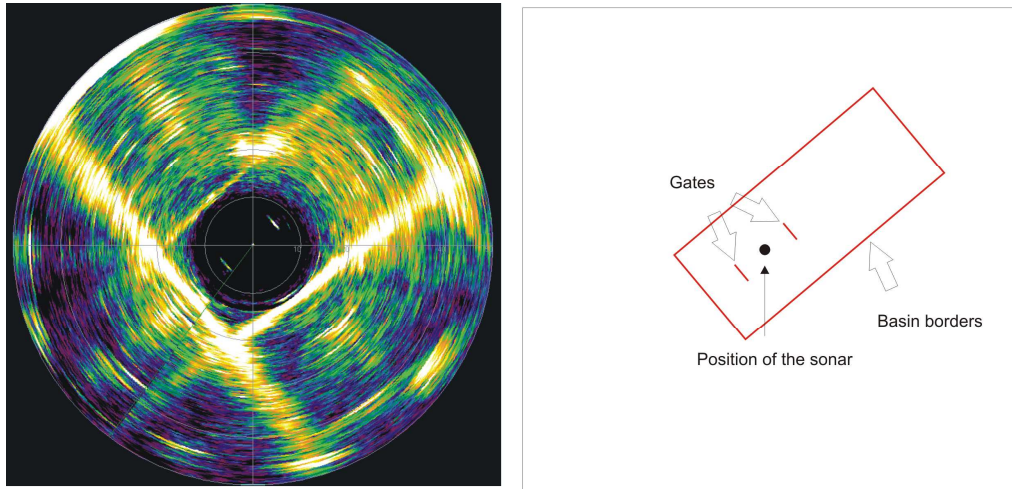


Figure 25: Image sonar et son interprétation

Communication

Un routeur Wifi D-Link DIR-600 associé à une antenne Wifi externe de 1 m nous permettent de communiquer avec SAUC'ISSE via un PC portable quand il est près de la surface de l'eau. SARDINE est muni d'un point d'accès Wifi D-Link DAP-1160 avec 2 ports Ethernet (Figure 26).



Figure 26: Router Wifi de SAUC'ISSE et point d'accès Wifi de SARDINE

Si on doit communiquer avec le sous-marin à de plus grandes profondeurs, on utilise un déport d'antenne de 5 m (avec les connecteurs étanches SMB Bulgin Buccaneer et du câble RG174). De plus, SAUC'ISSE a été équipé d'un port Ethernet étanche sur sa tape arrière (avec un connecteur étanche Switchcraft 8 pins) qui nous permet de brancher un câble Ethernet de 30 m relié à un PC portable sur terre ou une bouée flottante avec un point d'accès Wifi et une batterie (Figure 27).

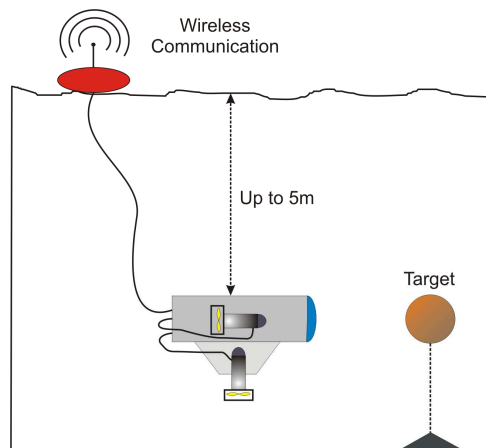


Figure 27: Déport d'antenne Wifi

Nous utilisons la « Connexion au bureau à distance » intégrée dans Windows XP pour accéder au bureau du PC embarqué via Wifi ou Ethernet (Figure 28). Une fois connecté, on peut alors lancer toutes les applications qu'on veut sur le PC embarqué, vérifier si tous les périphériques sont correctement détectés,... comme sur n'importe quel PC. L'avantage est que l'on n'a pas besoin de gérer la partie réseau dans le programme embarqué dans les robots, tout cela est géré par Windows.

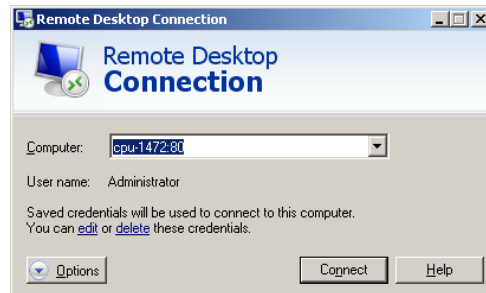


Figure 28: Connexion au bureau à distance de Windows

Energie / alimentation

L'alimentation de SAUC'ISSE est divisée en 2 parties (Figure 29) :

- Les propulseurs sont alimentés par une batterie de 12 V
- Le PC/104, le sonar, le routeur Wifi (via le 5 V fourni par l'étage d'alimentation du PC/104) et les caméras (via le 12 V fourni par l'étage d'alimentation du PC/104) sont alimentés par une batterie de 24 V (ou 2 batteries de 12 V en série)



Figure 29 : Batteries Ni-MH

Tous les autres périphériques (capteur de pression, centrale inertielle, Labjack) sont alimentés par le 5 V fourni par les ports USB du PC/104.

SARDINE a seulement une batterie de 12 V pour alimenter ses propulseurs, tous les autres périphériques sont alimentés par la batterie intégrée de l'EeePC, via le 5 V de ses ports USB.

Partie informatique / automatique

Localisation et contrôle

a) Principe

Des algorithmes de régulation en profondeur, cap, vitesse et distance classiques associés à d'autres algorithmes de détection, localisation et contrôle plus innovants forment l'intelligence du robot (Figure 30).

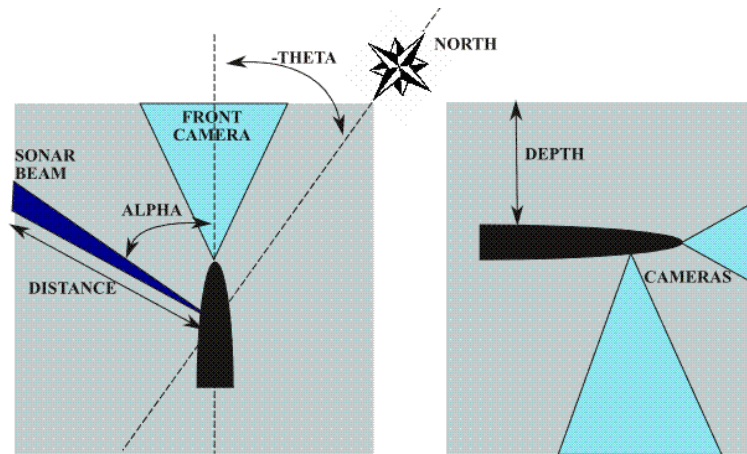


Figure 30: Localisation et détection

L'une des principales difficultés pour le robot est de pouvoir se localiser par rapport aux bords de la piscine où il évolue. La plupart des solutions existantes pour résoudre le problème de la localisation sont basées sur des techniques probabilistes (filtre de Kalman, estimation Bayésienne, filtres particulaires, voir [1]). Dans notre cas, un observateur d'état utilisant le calcul par intervalles [2] et prenant en compte des données aberrantes venant du sonar rotatif du sous-marin lui permet d'estimer sa position. De plus, une méthode originale supplémentaire mettant en jeu un contracteur sur l'image (voir [3] pour plus d'informations sur les contracteurs et [4] pour le contracteur sur l'image) est actuellement en cours d'élaboration. Un algorithme de SLAM utilisant la propagation de contraintes pourrait aussi être testé sur le sous-marin (voir [5] et [6] pour son application offline sur des données des sous-marins Redermor et Daurade du GESMA).

Le robot peut :

- Etre téléopéré de différentes façons en utilisant les algorithmes de régulation et contrôle voulus : pas de régulation, régulation en profondeur et régulation en cap et vitesse dans le plan...
- Effectuer des enchaînements de missions prédéfinies sous forme de scripts (fichiers texte avec quelques mots-clés prenant des paramètres) : successions et combinaisons entre régulations en profondeur, cap, vitesse ou distance dont les consignes changent au cours du temps ou appel à des fonctions particulières telles que l'activation du suivi de waypoints, mur ou boule rouge...

Les équations d'état du robot sous-marin peuvent être décrites de cette façon :

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = u_2 - u_1 \\ \dot{v} = u_1 + u_2 - v \end{cases} \quad (1)$$

où x, y sont les coordonnées du robot, θ son orientation et v sa vitesse. Les entrées u_1 et u_2 sont les accélérations fournies par les propulseurs droite et gauche. Ce modèle normalisé correspond à un robot sous-marin à une profondeur constante (la régulation en profondeur du robot est considérée comme déjà résolue et ne sera pas considérée ici) sans roulis ni tangage.

De cette manière, notre sous-marin peut être considéré comme un robot évoluant en 2 dimensions.

Pour prendre en compte la présence de données aberrantes, nous considérons qu'une pose du robot est valide si elle est consistante avec toutes les mesures faites aux temps $k \dots k-l$ sauf q d'entre elles (voir q-intersection dans [7] et [8]).

b) Observateur utilisé pour la localisation

Le système peut être discrétisé comme suit :

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}_k(x_k) \quad (2)$$

où δ est le pas de temps, $\mathbf{x} = (x, y, \theta, v)$ est le vecteur d'état et

$$\mathbf{f}_k \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 + \delta \cdot x_4 \cdot \cos x_3 \\ x_2 + \delta \cdot x_4 \cdot \sin x_3 \\ x_3 + \delta \cdot u_2(k) - \delta \cdot u_1(k) \\ x_4 + \delta \cdot u_1(k) + \delta \cdot u_2(k) - \delta \cdot x_4 \end{pmatrix} \quad (3)$$

On suppose que le robot se déplace dans une piscine de forme connue. Son sonar permet de mesurer la distance horizontale entre le robot et le bord de la piscine selon la direction pointée par le sonar (cette direction change au cours du temps car c'est un sonar rotatif). Si la piscine est composée de bords verticaux, l'équation d'observation du système est

$$d = g_k(x) \quad (4)$$

où g_k est une fonction d'observation donnée par un algorithme simple de calcul de distance à des segments.

Le principe de notre observateur est de calculer l'ensemble des états possibles $\mathbf{X}(k)$. Le centre $\hat{\mathbf{x}}(k)$ de $\mathbf{X}(k)$ est retourné par l'observateur en tant qu'estimation du vecteur d'état actuel du robot. Ce sera cette estimation qui sera utilisée par le contrôleur pour calculer le vecteur de contrôle $\mathbf{u}(k)$.

c) Contrôleur utilisé pour le suivi de waypoints

Le principe de ce contrôleur est décrit dans la figure suivante (Figure 31) :

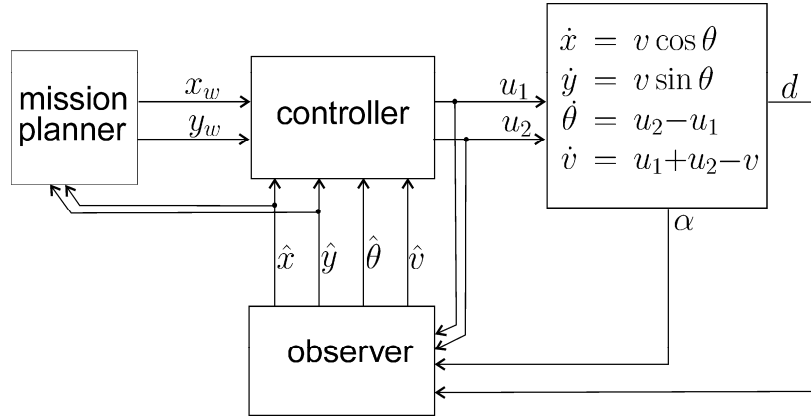


Figure 31 : Principe du contrôle du robot sous-marin

D'abord, le planificateur de mission envoie au contrôleur un waypoint (x_w, y_w) à atteindre. Lorsque le waypoint courant est atteint avec une précision prédéfinie (i.e. $(\hat{x} - x_w)^2 + (\hat{y} - y_w)^2 \leq \varepsilon$), le planificateur passe au waypoint suivant. Le contrôleur choisi est donné par l'expression suivante :

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} 1 - \omega \\ 1 + \omega \end{pmatrix}, \text{ où } \omega = \text{sign} \left(\det \begin{pmatrix} \cos \hat{\theta} & x_w - \hat{x} \\ \sin \hat{\theta} & y_w - \hat{y} \end{pmatrix} \right) \quad (5)$$

Le principal avantage de ce contrôleur est sa simplicité. La direction que le robot doit suivre est donnée par le vecteur $\mathbf{e} = (x_w - \hat{x}, y_w - \hat{y})^T$. L'orientation estimée du robot est donnée par le vecteur $\mathbf{v} = (\cos \hat{\theta}, \sin \hat{\theta})^T$. Si \mathbf{v} est à la droite de \mathbf{e} (i.e. $\det(\mathbf{v}, \mathbf{e}) < 0$), le robot tourne à droite ($\omega = 1$), autrement il tourne à gauche ($\omega = -1$).

d) Autonomie

Les actions de haut niveau telles que se déplacer à un point de coordonnées connues, suivre une trajectoire, rechercher un objet, suivre un bord de la piscine... peuvent être effectuées en exécutant les algorithmes de traitement suivis des algorithmes de déplacement de base selon leurs résultats. Ces actions sont implémentées dans le programme du robot en C/C++. Par contre, l'enchaînement de ces actions est spécifié sous forme de script (Figure 32). Cela permet de changer rapidement et facilement les missions que doit effectuer le robot et peut de plus être compris et pris en main par un non-spécialiste.

```

% this is a commentary. It is ignored by the program
% Example 1: go to depth -3m
%% step1: start depth regulation
depthreg -3
%% step2: wait 15s for the robot to actually get there
wait 15
% Example 2: some random movements at -3m
heading 1
wait 5
thrust 1
wait 10
stop
heading 1.57
wait 10
% Example 3: high level action
configureWallFollowing 12.5 1.2 -1.57 0 0.3 0.2 0.5
startWallFollowing
wait 20
stopWallFollowing
generalstop
depthreg 0

```

Figure 32 : Exemple de script de mission autonome

Traitement d'images

Les caméras et le sonar peuvent fournir des images pouvant être traitées pour détecter des objets, obtenir des informations de mouvement et de position... Différents algorithmes ont été prévus :

- Détection d'objet selon la couleur [9] (Figure 33). Certains objets peuvent être caractérisés par leur couleur. Cependant, les couleurs sont altérées dans l'eau : le rouge est plus absorbé que le bleu lorsqu'on s'éloigne d'un objet. Ces modifications peuvent être modélisées par une formule relativement simple, qui donne la couleur sous laquelle apparaîtra un objet dans l'eau selon la distance qui nous sépare de lui, connaissant sa couleur dans l'air. Des coefficients dans la formule (coefficients d'absorption du rouge, du vert et du bleu) doivent être déterminés auparavant par des expériences pour s'adapter à la piscine et aux conditions de luminosité.
- Détection de formes simples (lignes, cercles, rectangles,) avec par exemple la transformée de Hough classique et son équivalent par intervalles.
- Détection de mouvement : si le sous-marin est immobile et que l'on sait que l'objet cible bouge, on peut alors comparer des images successives pour voir ce qui a changé.
- Détection de points d'intérêts (lignes, objets, parties d'objet ou formes quelconques singulières et détectables dans plusieurs images consécutives) pour obtenir la vitesse du robot en observant le défilement du sol (flux optique) avec une caméra regardant vers le bas et connaissant son altitude.

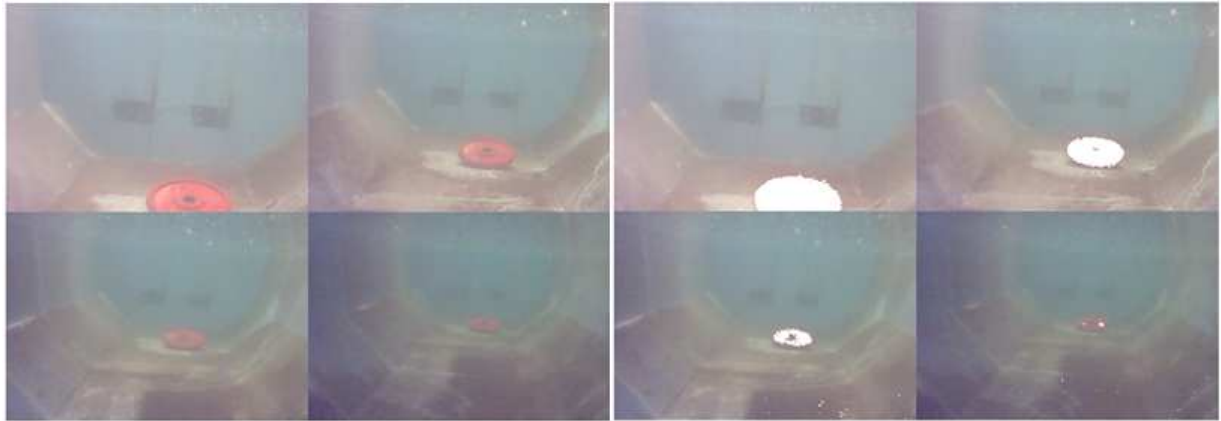


Figure 33 : Détection d'objets selon la couleur en prenant en compte l'absorption des couleurs dans l'eau selon la distance

Concours SAUC-E 2010

Déroulement / Epreuves

Cette année, le concours a eu lieu au NURC (NATO Undersea Research Centre) à La Spezia en Italie du 28 Juin au 4 Juillet 2010 (Figure 34). 10 équipes devaient participer à la compétition mais seulement 9 étaient présentes (la 10ème ne pouvait pas venir car elle utilisait son sous-marin pour d'autres projets).



Figure 34 : Zone de compétition de SAUC-E 2010

Les épreuves se sont déroulées dans l'eau de mer d'une marina. En 2008, nous avons déjà été confrontés à des épreuves en eau salée (dans l'une des piscines de l'IFREMER, à Brest) mais c'est la première fois que la compétition se déroulait directement en mer. Cela a rajouté quelques difficultés :

- Les mises à l'eau/sorties d'eau des sous-marins étaient plus difficiles car les bords de la marina n'était pas aussi pratiques que les bords des piscines que nous avons connues jusqu'à maintenant. De plus, les mouvements liés aux vagues étaient aussi gênants.
- La turbidité de l'eau nous empêchait de voir nous-mêmes les positions des objets et nos sous-marins (Figure 35). Les organisateurs n'avaient pas non plus prévu de caméras sous-marines pour filmer le fond de l'eau.
- Les zones de travail qui nous étaient réservées étaient assez petites.



Figure 35 : SAUC'ISSE dans l'eau lors de la finale

Les épreuves que les AUV (Autonomous Underwater Vehicle) devaient effectuer étaient les suivantes (Figure 36) :

- Choisir le point de départ du sous-marin. 2 points de départs étaient possibles. Le premier dit « Start 1 » se trouvait loin de la zone de mission et l'autre dit « Start 2 » se trouvait au milieu de cette zone. Un véhicule de surface autonome devait être utilisé pour amener le sous-marin au niveau du Start 2 à l'origine, mais finalement c'est en bateau que les sous-marins ont été positionnés.
- Passer ensuite par la porte de validation (aussi utilisée comme épreuve de qualification).
- Faire demi-tour et suivre un pipeline de couleur jaune à 50 cm de distance.
- Passer par la porte labélisée « Gate 2 ».
- Libérer une bouée se trouvant juste après « Gate 2 » en coupant le fil qui la maintenait.
- Suivre les murs formant l'un des coins de la piscine à une distance supérieure à 2 m.
- Tourner autour d'un pinger (générateur de signaux acoustiques) installé au centre de la zone de compétition.
- Faire surface au centre de la zone de compétition.

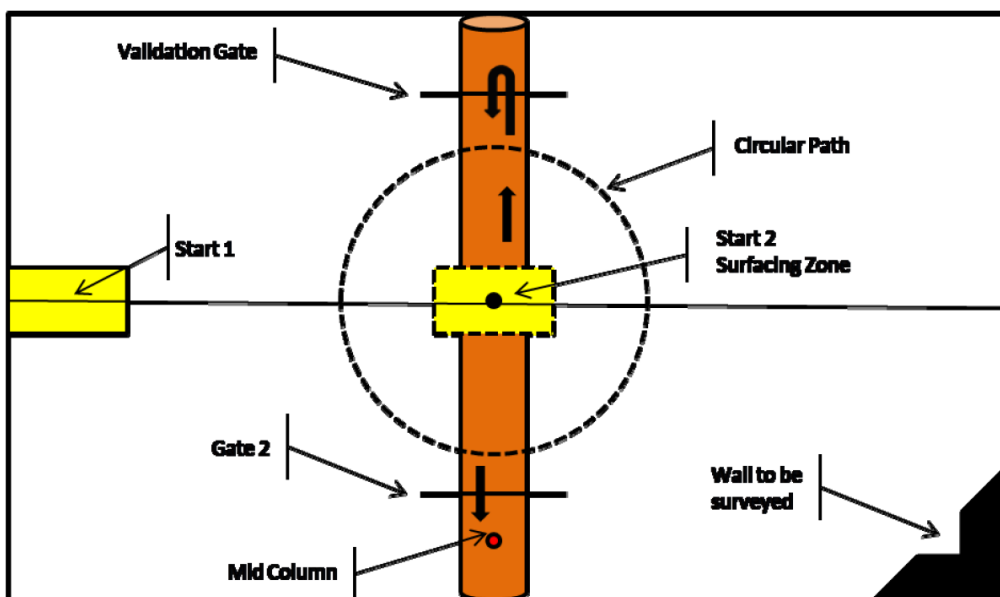


Figure 36 : Epreuves du concours SAUC-E 2010

L'épreuve de qualification (passage du Validation Gate) a été réalisée avec succès par SARDINE, SAUC'ISSE ayant des problèmes :

- Les masses des propulseurs avaient été mises en commun, ce qui n'était pas compatible avec les cartes de puissance que l'on a.
- Des faux contacts dans le circuit d'alimentation, refait pour gérer la nouvelle organisation des batteries : 2 batteries de 12 V en série pour le PC et ses périphériques + 1 batterie de 12 V pour les propulseurs et cartes de puissance.
- L'alimentation des caméras ne fonctionnait plus (court-circuit au niveau des connecteurs étanches ?).

Lors des épreuves individuelles (où on pouvait gagner des points en faisant des missions individuelles), nous avons eu un problème avec la centrale inertielle de SARDINE, qui l'a rendu inutilisable jusqu'à la fin de la compétition.

C'est SAUC'ISSE qui a tenté les épreuves finales : il a passé le 1^{er} gate, tenté de suivre le pipeline et de passer dans le 2^{ème} gate (il l'a raté de peu), a touché la bouée à libérer et est resté coincé dessus, ce qui l'a empêché de faire le suivi de mur correctement.

En plus des problèmes précédemment cités, nous avons eu d'autres difficultés qui nous ont gênés pendant l'utilisation des sous-marins :

- Le nombre de câbles à l'arrière de SAUC'ISSE est devenu important suite à notre réorganisation pour faciliter le remplacement des batteries.
- Le propulseur vertical de SARDINE était un peu mal placé : il perdait de la puissance inutilement car il était trop près du tube formant la base du sous-marin, ce qui rendait les descentes en profondeur plus lentes et nécessitait un équilibrage du sous-marin précis.
- Nous avons eu des petits problèmes d'étanchéité, principalement sur SARDINE.
- Il y avait des interférences avec les réseaux Wifi des autres équipes. Ce problème risque de devenir de plus en plus gênant si le nombre d'équipe augmente l'année prochaine.
- L'un des chariots permettant de transporter les robots s'est cassé.

Points forts de cette année

Ce qui nous distinguait des autres équipes cette année était le fait que nous ayons 2 robots. Au début, cela nous faisait 2 fois plus de problèmes à régler mais au final, on a pu voir qu'on avait de cette façon plus de chances d'avoir un robot fonctionnel à tout moment.

On a pu voir que tel qu'il a été réalisé, SARDINE est simple et rapide à utiliser : il est à la fois parfait pour des étudiants et parfait pour tester des algorithmes facilement.

Au final, on a réussi à améliorer notre niveau global de fiabilité ainsi que notre expérience grâce à nos 2 robots.

Perspectives, travaux restants et projets

Certains travaux déjà commencés vont être continués : des tests de communication acoustique ont été tentés mais le dispositif réalisé n'est pas encore vraiment utilisable sur le sous-marin. Il nous faudra trouver une solution plus aboutie pour pouvoir tenter une communication et collaboration entre sous-marins.

Le travail pour faire une trajectoire donnée en mode autonome en se basant sur une vidéo prise par le robot lors du parcours de cette trajectoire en mode télé-opéré a commencé à être testé mais des ajustements et des tests supplémentaires doivent être faits pour le valider (Figure 37).



Figure 37 : SARDINE lors de tests dans la piscine du nouveau bâtiment de l'ENSIETA

Une localisation par chocs pourrait être possible : le fait que le sous-marin heurte un bord de la piscine pourrait être détecté par la centrale inertielle (forte accélération due aux chocs, les accélérations liées aux autres changements de vitesse du sous-marin n'étant pas détectables) et utilisé pour calculer la position du sous-marin par rapport aux bords. Ceci ne nécessitant pas de sonar, des tests pourraient être faits avec SARDINE.

Pour accroître nos possibilités de tests dans l'eau nous comptons prévoir un câble d'alimentation et communication Ethernet étanche qui pourrait être déconnecté quand on est dans l'eau, pour d'une part ne plus être limité par nos batteries et d'autre part être sûr de pouvoir utiliser notre sous-marin même en cas de fortes interférences Wifi.

Bibliographie

- [1] Thrun S., Bugard W., Fox D. (2005), *Probabilistic Robotics*, MIT Press, Cambridge, M.A., United Kingdom.
- [2] Jaulin L., Kieffer M., Didrit O., Walter E. (2001), *Applied Interval Analysis, with Examples in Parameter and State Estimation, Robust Control and Robotics*, Edition Springer-Verlag, London, United Kingdom.
- [3] Chabert G., Jaulin L., "QUIMPER, A Language for Quick Interval Modelling and Programming in a Bounded-Error Context", *Artificial Intelligence*, 173:1079-1100, 2009.
- [4] Sliwka J., Le Bars F., Reynet O., Jaulin L., "Using interval methods in the context of robust localization of underwater robots", submitted to NAFIPS, El Paso, 2011.

- [5] Jaulin L., “*A Nonlinear Set-membership Approach for the Localization and Map Building of an Underwater Robot using Interval Constraint Propagation*”, IEEE Transaction on Robotics, Vol 45, 25(1):88-98, 2009.
- [6] Le Bars F., Bertholom A., Sliwka J., Jaulin L., “*Interval SLAM for underwater robots; a new experiment*”, NOLCOS, Bologna, 2010.
- [7] Jaulin L., “*Robust set membership state estimation; Application to Underwater Robotics*”, Automatica, Vol 45, Issue 1, pp. 202-206, 2009.
- [8] Sliwka J., Le Bars F., Jaulin L., “*Calcul ensembliste pour la localisation et la cartographie robustes*”, JD-JN-MACS, Angers, 2009.
- [9] S. Bazeille, *Vision sous-marine monoculaire pour la reconnaissance d'objets*, Ph.D. Thesis, Université de Bretagne Occidentale, 2008