

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

Compte rendu final pour l'année 2006/07

Luc JAULIN
ENSIETA
2 rue François Verny
29200 Brest

Résumé

Dans le cadre d'un projet étudiant, un groupe d'élèves de l'ENSIETA a réalisé un robot sous-marin autonome. Celui-ci devra à terme être capable de se localiser et de repérer des objets dans une piscine. L'objectif principal était de réaliser un robot simple et facilement réutilisable par d'autres étudiants. C'est pourquoi ce robot est basé sur des technologies éprouvées (une architecture mécanique basée sur un tube et 4 propulseurs, et une architecture électronique réduite au minimum et basée sur des composants déjà existants). Le robot sert cependant de support à de nombreux thèmes de recherche en particulier au niveau de la localisation du robot de façon dynamique dans une piscine et de la reconnaissance d'objets en milieu sous-marin.

Le robot a alors participé au concours SAUC'E (Student Autonomous Underwater Challenge – Europe) est organisé conjointement par le Ministry of Defense (MoD) Britannique et la Délégation Générale pour l'Armement (DGA). La deuxième édition de ce concours s'est déroulée du 12 au 15 juillet 2007 à Gosport dans la baie de Portsmouth (UK).

1. Introduction

La réalisation d'un robot sous-marin autonome répond aujourd'hui à de nombreux objectifs. Un robot sous marin est d'abord utilisé dans le cadre de la défense : recherche de mines, sécurisation d'un chenal, détection d'obstaclesⁱ... Cependant les applications d'un tel sous-marin ne sont pas uniquement militaires. Ceux ci sont également utilisés à des fins scientifiques (exploration de fond sous marin, recherche d'épavesⁱⁱ,...), mais on peut également dans le futur envisager des actions autonomes de secours en mer, ou bien plus simplement nettoyer de façon automatique une piscine et vérifier en permanence que des enfants ne sont pas tombés dedans et le cas échéant être capable de les remonter à la surface.

Afin de participer à un concours organisé par le MODⁱⁱⁱ (équivalent britannique de la DGA), un groupe d'étudiants de deuxième et troisième année de l'ENSIETA, encadrés par des professeurs, a réalisé un prototype de robot sous-marin autonome : SOS (Small Outsider for SAUCE). Celui-ci devra être capable de se localiser dans une piscine et d'y repérer différents objets. Cela nous a conduits à équiper le sous-marin d'un sonar et d'une centrale inertielle (afin de se localiser) et de deux webcams (afin de repérer les différents objets). Si aujourd'hui l'architecture électronique et

mécanique du sous-marin est en phase de finalisation, celui-ci reste un objet de recherche en particulier au niveau de la localisation et de la vision sous-marine.

L'objectif de cet article est de présenter les différents choix techniques qui ont conduit à la réalisation de ce sous-marin. Nous présenterons d'abord l'architecture mécanique du sous-marin, puis son architecture électronique.

2. Architecture mécanique



Figure 1 : le robot SOS en surface

a) Architecture générale

Le robot sous-marin réalisé devait respecter ces 5 règles :

- être étanche
- être simple
- être stable en roulis et en tangage
- être résistant à une plongée de 10 m
- être capable d'embarquer l'électronique prévue

Le choix d'un tube s'est vite imposé car celui-ci présente de nombreux avantages :

- c'est une forme largement répandue
- il présente naturellement une grande résistance à la pression

- les problèmes liés à l'étanchéité d'un tube étaient maîtrisés dans notre école grâce à une précédente expérience : la réalisation d'un glider de taille réduite par le laboratoire DTN (département des techniques nouvelles)

Le choix du tube utilisé a été guidé par les deux critères suivants :

- être amagnétique et résister à la corrosion (ce qui nous laissait le choix entre l'aluminium et le PVC)
- être capable de contenir la carte mère embarquée

L'ensemble de ces critères a donc conduit au choix d'un tube en aluminium de 17 cm de diamètre intérieur et de 1 m de long déjà disponible à l'école. Ce tube est fermé par deux tapes en aluminium, fixées sur deux portes tapes en pvc nous permettant de ne pas limiter le diamètre intérieur du tube. Ce sont les pièces critiques du sous-marin car ce sont celles-ci qui en assurent l'étanchéité. Sur ces tapes sont fixés des connecteurs étanches qui permettent de relier les moteurs, les webcams, l'antenne wifi et le sonar à la carte mère embarquée. Les connecteurs les plus utilisés dans le milieu sous-marin sont les connecteurs JUPITER, cependant ceux-ci ont comme principal inconvénient d'être excessivement cher par rapport à notre budget initial (environ 1000€ pour un connecteur complet). Nous avons donc retenu des connecteurs IP68^{iv} qui sont capables de résister à une pression d'environ 1 bar (pression à 10m de profondeur) dont le prix est aux alentours de 15€ le connecteur complet.

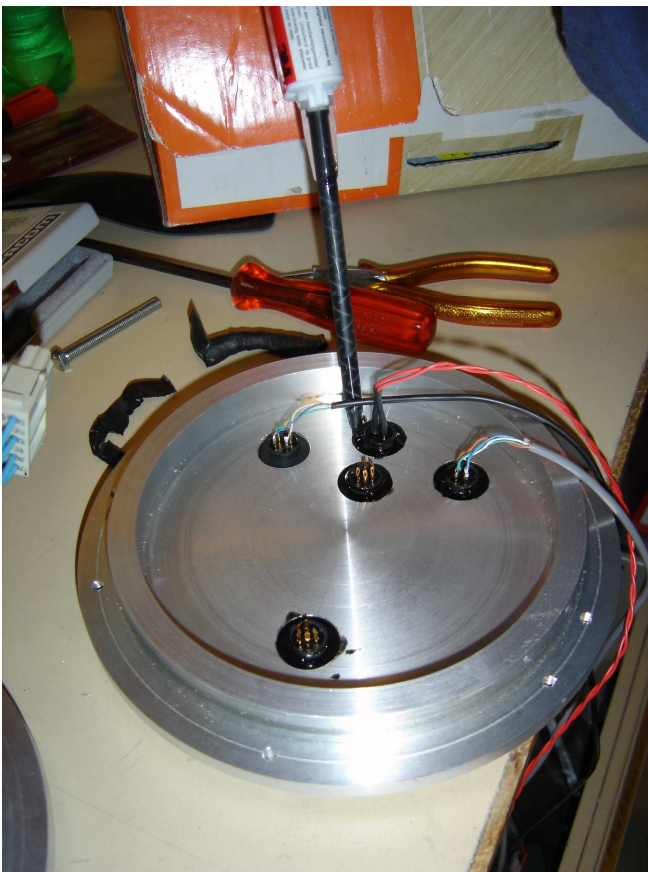


Figure 2 : montage des connecteurs de la tape avant

b) Stabilité et propulsion du sous marin

Nous avons fait le choix d'une architecture classique basée sur 4 propulseurs :

- 2 propulseurs verticaux permettant de régler la profondeur du sous-marin

- 2 propulseurs horizontaux permettant de régler la vitesse et le cap

Le roulis et le tangage ne sont pas contrôlés mais ceux-ci sont stables grâce à la présence d'une quille lestée qui sert également de support au sonar.

Les propulseurs ont été choisis chez LECMA-RC^v. Le modèle « SPEED 720 BB » utilisé possède les caractéristiques suivantes :

| | |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| Tension nominale | 12 V |
| Plage de tension d'alimentation | 6 ... 13 V |
| Régime de rotation à vide | 4100 tours. min ⁻¹ |
| Consommation à vide | 0,75 A |
| Consommation au rendement maximum | 3 A |
| Longueur du carter, sans l'arbre | 72 mm |
| Diamètre | 44,5 mm |
| Poids | 380 g |

Ceux-ci sont livrés en pièces détachées et doivent être montés dans les boîtiers étanches prévus à cet effet.



Figure 3 : Les propulseurs et leur boîtier étanche

Les propulseurs ont été fixés sur un support en PVC, puis installés sur les ailes situées de part et d'autre du sous-marin. Celles-ci ont été réalisées avec des barres en T en aluminium et fixées sur le tube à l'aide de deux colliers selon le schéma de la figure 4.

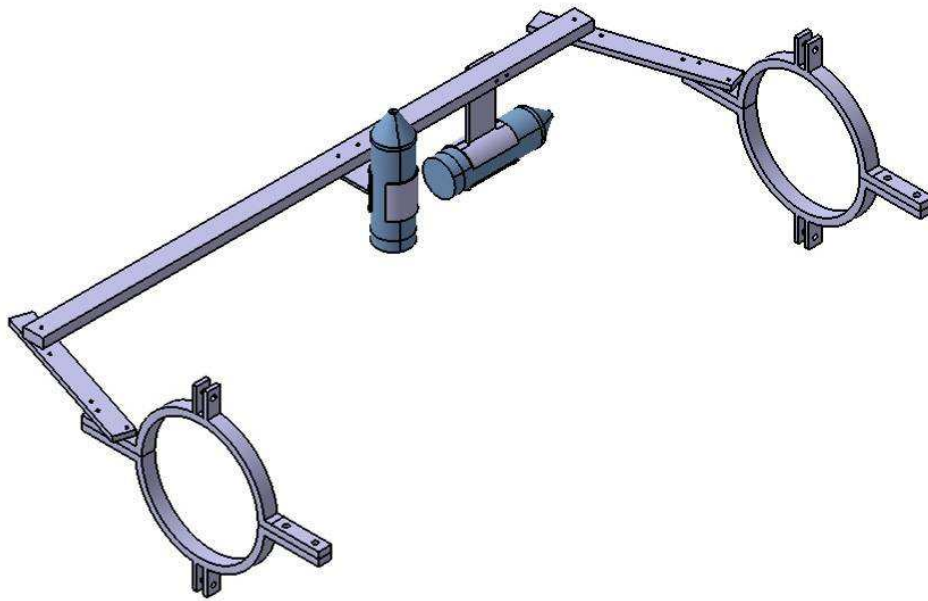


Figure 4 : schéma d'installation des moteurs

c) Squelette intérieur

L'ensemble de l'électronique est disposée sur une plaque de PVC, renforcée par une barre en T en aluminium. Le squelette intérieur est solidaire de la plaque avant, ce qui permet de le fixer facilement dans le tube. Les opérations de montage/démontage sont ainsi facilitées.

Les batteries sont fixées dans le tube, sous la plaque de PVC afin de garantir la stabilité du sous-marin.

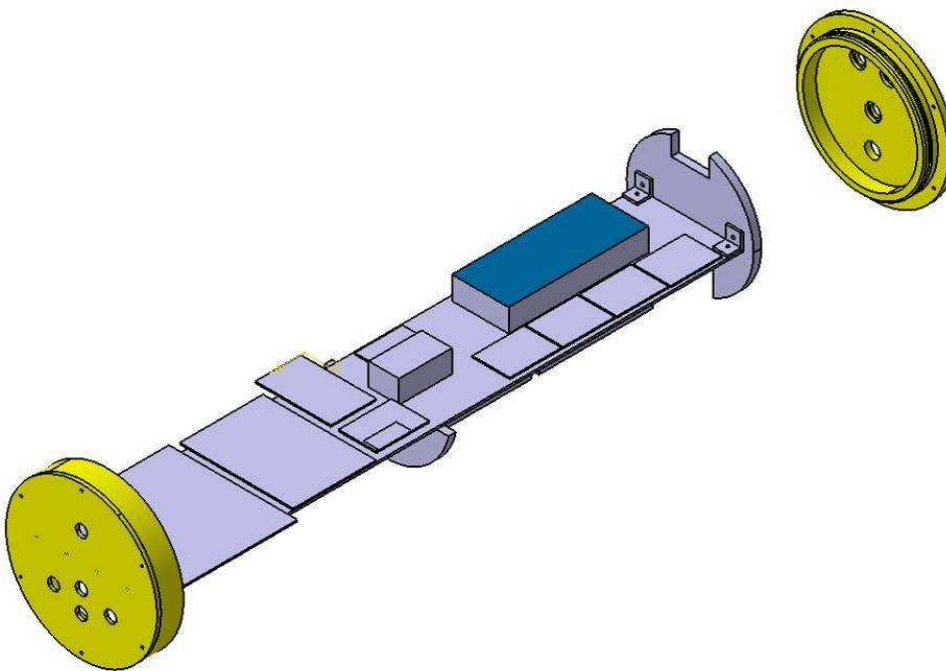


Figure 5 : squelette intérieur du sous-marin

3. Architecture électronique

Le robot que nous construisons devant être capable à la fois de se localiser dans la piscine et de repérer des objets de différentes formes et couleurs, nous avons fait le choix de l'équiper des capteurs suivant :

- un capteur de pression permettant de déterminer sa profondeur
- un sonar et une centrale d'attitude permettant de le localiser par rapport aux bords de la piscine
- deux webcams, l'une dirigée vers le bas, l'autre vers l'avant

Tous ces différents capteurs sont reliés à une carte mère embarquée qui doit-être suffisamment puissante pour permettre d'effectuer le traitement d'image et la localisation.

Les moteurs quand à eux sont commandés à l'aide d'un boîtier de type Labjack relié en USB à la carte mère embarquée et alimentés à l'aide de cartes de puissance

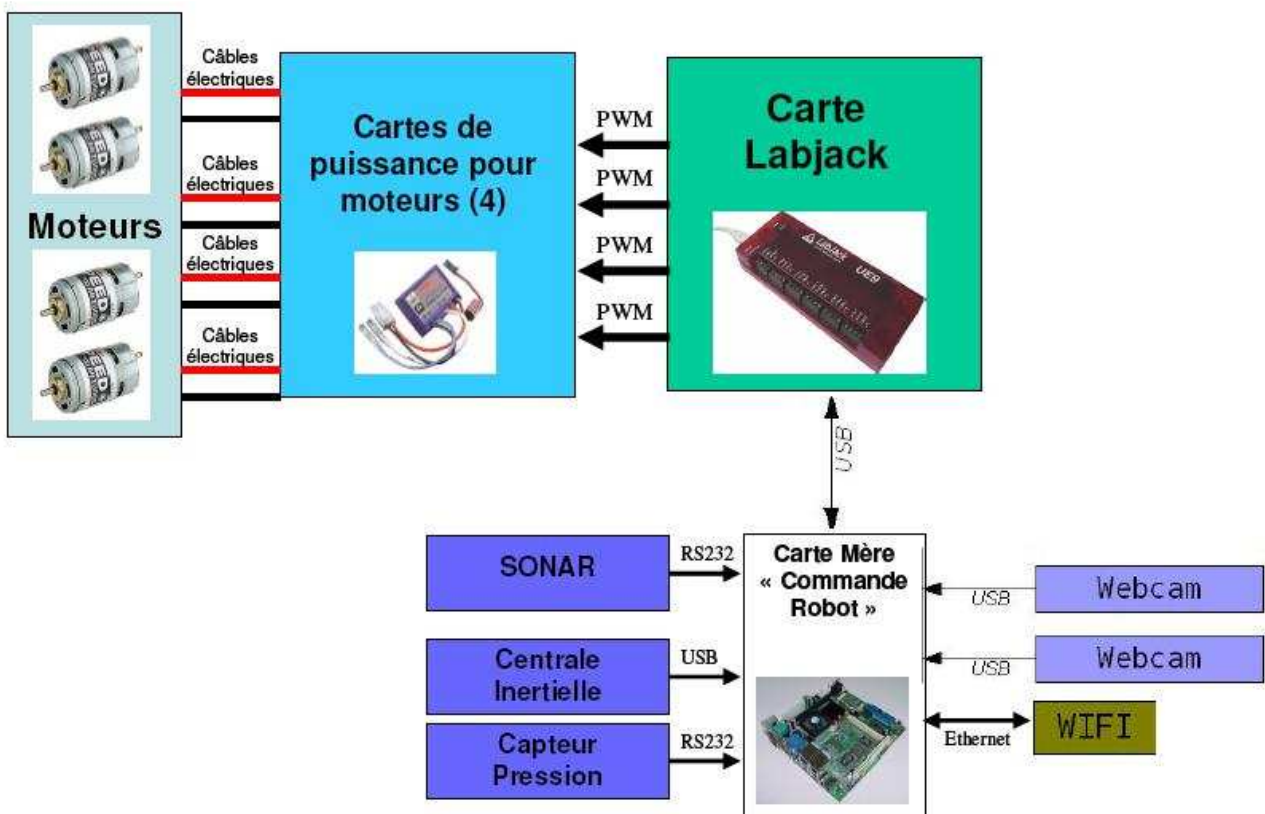


Figure 6 : Organigramme des entrées-sorties, cartes et capteurs utilisés

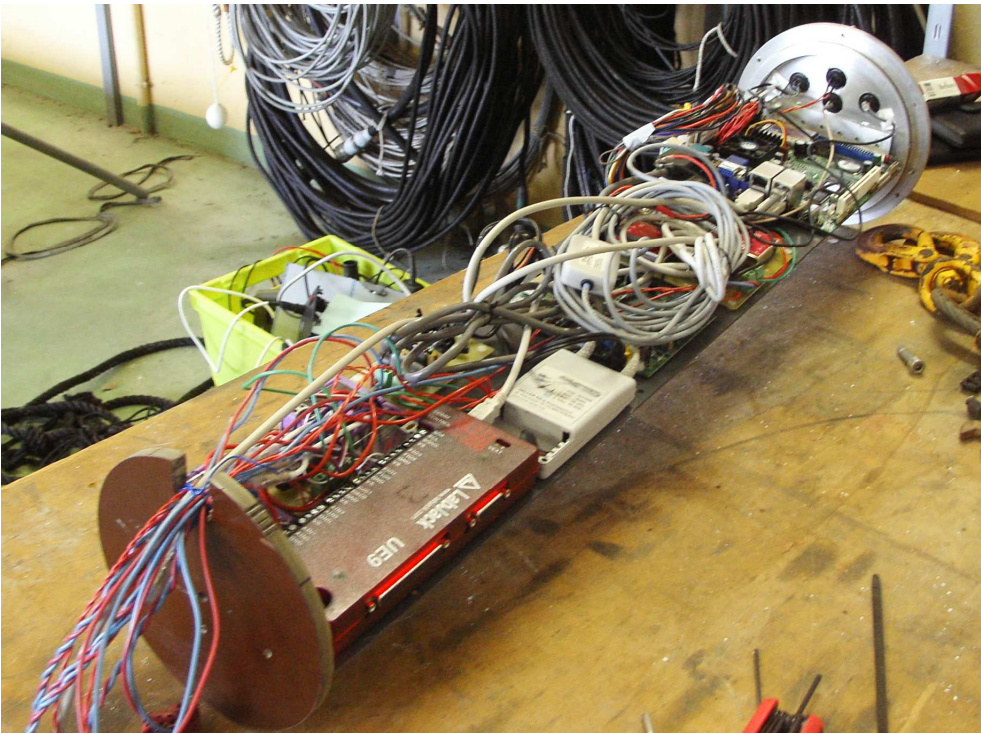


Figure 7 : Implantation de l'électronique à l'intérieur du sous-marin

a) Alimentation

Le circuit d'alimentation est divisé en trois parties :

- La partie puissance qui alimente chacune des cartes de puissance en 12V
- La partie numérique qui alimente la carte mère et le routeur en 12V
- Le sonar nécessite lui une alimentation spécifique en 24V

Cette séparation en plusieurs parties est due essentiellement au fait que la mise en marche des moteurs peut générer un appel de courant et donc provoquer une chute de tension.

Chaque carte d'alimentation est composée d'une partie protection (fusible et diode), et d'une partie commande (interrupteur à lame souple et transistor de puissance). De plus la partie numérique est régulée en tension.

b) Carte mère embarquée et système d'exploitation

Il existe de très nombreux processeurs spécifiquement dédiés à l'embarqué. Ceux-ci présentent de nombreux avantages en particulier l'implantation sur des cartes mères de très petite dimension (66x72mm par exemple pour la carte Fox conçue par la société Acme System^{vi}) et leur très faible consommation. Cependant ils présentent également des inconvénients notables en particulier leur faible puissance, la diversité des architectures proposées (80x86 (le standard des PC), mais également ARM7, ARM9, Motorola 6800), leur extensibilité difficile (mémoire vive et mémoire de masse sont en effet directement intégrés à la carte mère).

C'est pourquoi nous nous sommes tournés vers les cartes mères de la famille mini-ITX. Ce sont des cartes mères initialement développées pour les mini PC silencieux de salon. Elles présentent

l'avantage d'être architecturés autour de processeurs de la famille des 80x86 standards, et d'être facilement évolutives dans le respect du standard PC (elles supportent jusqu'à 1Go de mémoire DDR, et permettent d'utiliser des cartes Compact Flash à la place d'un disque dur). Leur taille reste raisonnable (17x17cm), ainsi que leur consommation.

Nous avons choisi la carte LV667 de chez Commell architecturée autour d'un processeur VIA C3 1Ghz que nous avons équipé de 1Go de DDR et d'une carte Compact Flash de 2Go.



Figure 8 : La carte-mère Commell LV667

Il existe aujourd'hui de nombreux systèmes d'exploitation pour PC, même si Microsoft conserve un quasi monopole. Cependant son système d'exploitation Windows (et sa déclinaison pour l'embarqué Windows CE) présente de nombreux inconvénients liés en particulier à la non disponibilité des sources du système d'exploitation ce qui nous empêchent de le personnaliser. De plus la construction de drivers personnalisés pour des systèmes différents de Windows XP reste difficile. Nous nous sommes donc naturellement tournés vers le système d'exploitation Linux qui est aujourd'hui de plus en plus répandu dans le monde universitaire, dont les sources sont librement disponibles.

Construire son propre système Linux est possible comme en témoigne le livre *Linux From Scratch*^{vii} (Linux parti de rien), mais cependant le processus est long et présente l'inconvénient d'être difficilement réutilisable. Nous avons fait le choix de partir d'une distribution Linux et de la personnaliser. Nous avons utilisé la distribution Mandriva qui présente l'avantage de pouvoir être installée en mode texte et d'être mise à jour régulièrement. Comme ce système était également utilisé sur la plate forme de développement cela présentait également l'avantage d'avoir une installation symétrique sur le PC embarqué et la plate-forme de développement. Pour la personnalisation du système embarqué final nous nous sommes très largement inspirés du livre *Linux embarqué*^{viii} de Pierre Ficheux.

c) Commande des propulseurs

Afin de commander les moteurs nous avons utilisé une carte Labjack UE9^{ix}. Le module "LabJack UE9" est un système professionnel d'acquisition de données universel à connexion USB ou Ethernet. Ce module est doté de nombreux ports d'entrée-sortie et permet en particulier de générer jusqu'à 6 signaux PWM. Il dispose également d'un capteur de température qui nous permet de contrôler la température interne du sous-marin et ainsi d'éviter une surchauffe à l'intérieur du tube.



Figure 9 : le boîtier Labjack UE9

Le constructeur de la carte Labjack fourni un package de « squelettes » de code qu'il est possible d'adapter aux situations voulues. Cela nous a permis de contrôler l'ensemble des ports d'entrées-sorties du Labjack.

Le mode PWM (Pulse With Modulation, en français MLI pour modulation de largeur d'impulsion) sert à générer un train d'onde de fréquence constante, mais de rapport cyclique variable.

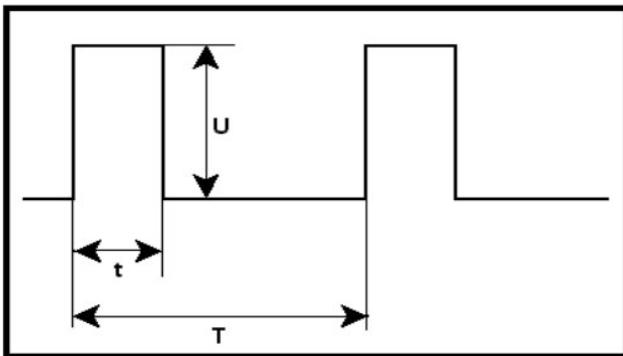


Figure 10 : Principe de fonctionnement du PWM

La tension U et la période T sont fixes tandis que la largeur d'impulsion t varie.
La tension moyenne appliquée est proportionnelle au rapport cyclique :

$$V_{moy} = \frac{t * U}{T}$$

Les cartes de puissance sont des interfaces de puissance entre les signaux provenant du boîtier Labjack et le fonctionnement des moteurs. Elles permettent d'assurer une propulsion progressive du moteur en marche avant comme en marche arrière et de délivrer la puissance requise. Le modèle que nous avons choisie (ROKRAFT 100 μ p de la marque ROBBE) a une capacité de 15-20 Ah en continu, ce qui est très largement surdimensionné car sous l'eau les moteurs

consomment environ 1,5 Ah à plein régime.

d) Communication

Afin de communiquer avec le sous-marin nous disposons à la fois du Wifi (qui nous permet de diriger le sous-marin lors des phases de test), mais également de 4 interrupteurs « marche /arrêt » placés sur la tape arrière.

- *Communication via WIFI*

Il existe aujourd'hui de nombreux périphériques WIFI disponibles à la fois sur bus USB ou PCI. Cependant ceux-ci présentent l'inconvénient de ne pas forcément être facile à installer sous linux, en particulier dans un système embarqué qui ne peut faire appel à ndiswrapper (un logiciel qui permet d'utiliser les drivers WIFI Windows sous Linux). Nous avons donc choisi d'intégrer directement un routeur WIFI (que nous avons démonté afin de n'utiliser que la carte électronique sans son boîtier) dans le sous-marin celui-ci étant relié à notre carte mère via une interface ethernet classique à l'aide d'un câble croisé.

Même si on réussissait à capter le signal WIFI lorsque le sous-marin était à la surface, nous avons quand même décidé de sortir l'antenne WIFI. A l'aide d'un câble coaxial nous avons réalisé une antenne quart d'onde, et nous avons raccordé celui-ci au sous-marin à l'aide d'un connecteur 6 broches : la broche centrale étant reliée à la phase, et les 5 périphériques à la masse. Ceci nous permet de garder le contact avec le sous-marin même lorsque celui-ci est en plongée.

- *Les interrupteurs*

Le sous-marin est équipé de quatre interrupteurs « marche / arrêt » placés sur la tape arrière. Il y a un interrupteur pour la carte PC, un pour les quatre moteurs, un autre pour le sonar et le point d'accès WIFI et un dernier pour le démarrage du robot. Le système choisi est l'ILS (interrupteur à lame souple), qui sera collé à l'intérieur, sur la tape arrière du sous-marin. Le contact sera fait en approchant un aimant de l'autre côté de la tape (des emplacements ont été creusés au niveau de la tape arrière afin de faciliter le contact).

Les trois cartes d'alimentation comportent un transistor de puissance et un connecteur relié à un des ILS. L'ILS ne peut supporter qu'un faible courant le traversant, or nous devons alimenter des éléments comme la carte PC et les moteurs. Le courant à fournir par la batterie va être élevé et l'ILS ne pourra pas le supporter, c'est pourquoi nous utilisons un transistor de puissance qui sera commandé par l'ILS. Nous avons choisi de prendre un transistor MOSFET canal N.

Il n'y a pas de contrainte particulière sur les ILS choisis pour le robot. Nous avons donc pris la plus petite des ampoules, sa durée de vie étant largement assez grande ($20 \cdot 10^6$ manœuvres). Un ILS fonctionne avec un aimant (Ferrite) que nous avons également dû commander.



Figure 11 : interrupteur à lame souple

e) Localisation

- *Profondeur*

Afin d'estimer la profondeur à laquelle se trouve notre sous marin nous utilisons un capteur de pression P33X de chez Keller^x qui possède une précision de l'ordre du mbar (ce qui correspond à un écart de profondeur de l'ordre du cm). Il présente l'avantage de présenter une sortie numérique de type RS485 qui peut-être relié à un PC via une interface série ou USB à l'aide d'un adaptateur. De plus le protocole de communication de ce capteur est très largement documenté ce qui nous a permis de développer un programme nous permettant d'utiliser ce capteur sous Linux.

- *Déplacement horizontal*

Afin d'estimer la position et la vitesse du sous-marin en déplacement nous cherchons à développer un observateur basé sur un filtre de Kalman. Celui-ci prend comme entrées le cap du sous marin (déterminé à l'aide de la centrale inertielle), l'angle du sonar et la distance renvoyée par celui-ci. Il nous renvoie la vitesse du sous-marin ainsi que sa position horizontale par rapport aux bords de la piscine.

- *La centrale d'attitude*

Nous avons utilisé une centrale inertielle Mti construite par la société Xsens^{xi}. Celle-ci nous donne en temps réel :

- les angles de cap, de roulis, de tangage
- les accélérations linéaires suivant les axes x, y et z
- les vitesses angulaires suivant les axes x, y et z
- les composantes du champ magnétique terrestre sur les axes x, y et z

Cependant du fait de la faible vitesse du sous-marin et de sa stabilité en roulis et en tangage, seul l'angle de cap est utilisable. Cependant celle-ci reste beaucoup plus fiable qu'une boussole car elle permet de compenser automatiquement les variations magnétiques.

Cette centrale se connecte directement à un PC via un port USB et est livré avec les sources d'un programme exemple qui nous a permis de développer notre propre application sous Linux.

- *Le sonar*

A l'origine nous avons envisagé d'utiliser un système basé sur deux échosondeurs montés à 90° l'un regardant vers l'avant du sous-marin, l'autre vers un des côtés. Cependant le prix d'un tel système reste très élevé (de l'ordre de 1500£ par échosondeur pour un système tout équipé permettant une connection directe sur un PC). C'est pourquoi nous avons utilisé un sonar Tritech Miniking^{xii} prêté par Mr SEUBE du laboratoire DTN de l'ENSIETA. Celui-ci possède les caractéristiques suivantes :

- unité extrêmement compacte
- modèle avec port auxiliaire RS-232
- alimentation modulable en 12, 24 ou 48 V à 6 VA
- fréquence de fonctionnement à 675kHz
- faisceau d'ouverture 40° vertical et 3° horizontal
- transducteur sur tête mécanique dépointable à 360°

Il est de plus facile à positionner sur la quille du sous-marin.

Ce sonar peut être utilisé selon différents modes. Nous avons retenu un balayage continu sur 360°. Comme ce balayage est assez lent (un tour est effectué en 15 secondes) nous avons donc créé un

programme sous linux qui permet d'avoir accès en permanence aux données sonar correspondant au dernier tour effectué.



Figure 12 : le sonar Miniking de chez Tritech

f) Vision

Les webcams sont aujourd'hui devenues des périphériques courant sur la plupart des PC et il existe de très nombreux modèles utilisables directement sous Linux. Nous avons testé différents modèles que nous avons ensuite démontés et intégrés dans un boîtier étanche du même type que ceux utilisés pour les propulseurs. Les caméras ont été placées dans un socle de mousse expansé qui permet d'assurer la stabilité de la caméra dans son support. Les boîtiers sont fermés hermétiquement après s'être assuré de la mise au point de la distance focal de l'objectif réglé sur l'infini.

5. Compétition

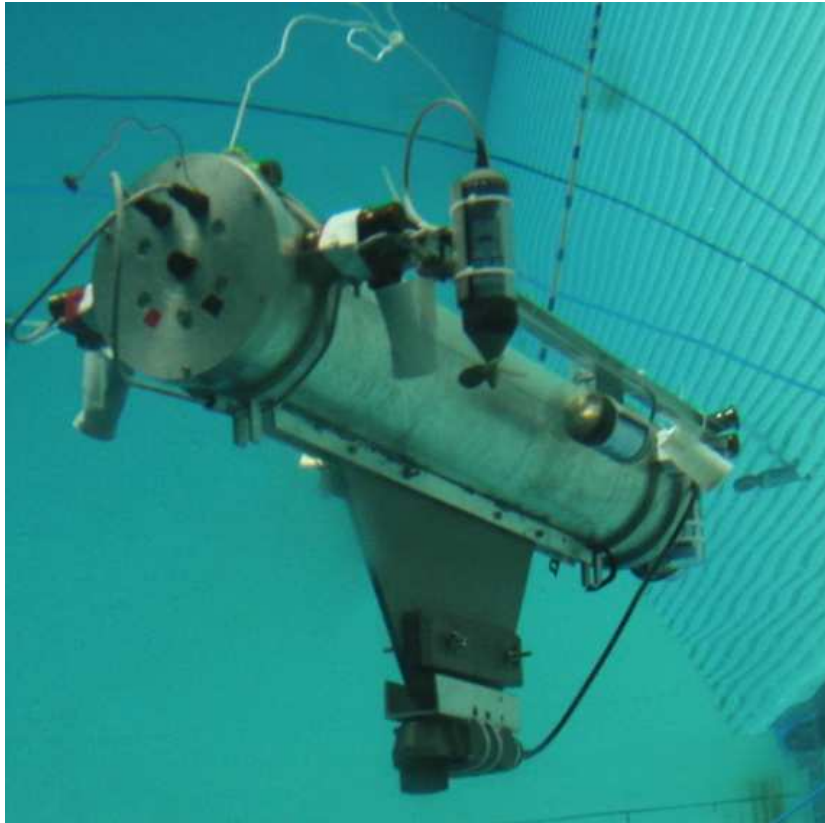


Photo du robot SAUCISSE

Le concours SAUC'E (Student Autonomous Underwater Challenge – Europe) est organisé conjointement par le Ministry of Defense (MoD) Britannique et la Délégation Générale pour l'Armement (DGA). La deuxième édition s'est déroulée du 12 au 15 juillet 2007 à Gosport dans la baie de Portsmouth (UK). Elle a réuni 6 équipes venant du Royaume Uni (Bath, Southampton, Heriott Watt, Cambridge) et de France (ENSIETA et Nice). SAUCISSE s'est hissée sur la troisième marche du podium et a également remporté le prix innovation et contrôle décerné par Thalès.



Saucisse est un robot sponsorisé par la DGA

L'équipe SAUCISSE 2007 : Florent, Sébastien, Stéphane, Thomas et Fabrice

SAUCE est une compétition de robots sous-marin autonomes réalisés par des équipes étudiantes. Il est composé de plusieurs épreuves en particulier le passage d'un cadre, la détection de cible, la remontée à un endroit prédéterminé et la cartographie du fond d'une piscine.

Ce qu'il reste à faire

Dans le cadre du concours SAUCE nous avons réalisé un prototype de robot sous-marin. Nous sommes aujourd'hui capables de le faire se mouvoir via une communication WIFI et de le localiser dans une piscine à l'arrêt. L'ensemble des capteurs est aujourd'hui opérationnel (webcams, capteurs de pression, sonar, centrale inertielle) et va nous permettre de le rendre autonome. Il est actuellement capable de se localiser en dynamique dans une piscine et d'y repérer différents objets comme une boule rouge ou un pneu. Mais toutes ces tâches ne sont pas accomplies de façon fiable. Pour la prochaine compétition, il nous faudra

- 1) fiabiliser l'ensemble,
- 2) faire un tableau de bord sur le PC distant, qui nous permette de savoir à chaque instant quel est l'état du robot,
- 3) et valider la technique de localisation

Enfin, nous envisageons participer au concours SAUC'E 2008. Si tel est le cas il nous faudra aussi sûrement, suivant l'évolution du concours, revoir certains choix sur la mécanique et sur l'électronique.

5. Conclusion

Dans le cadre du concours SAUCE nous avons réalisé un prototype de robot sous-marin. Nous sommes aujourd'hui capables de le faire se mouvoir via une communication WIFI et de le localiser dans une piscine à l'arrêt. L'ensemble des capteurs est aujourd'hui opérationnel (webcams, capteurs de pression, sonar, centrale inertielle) et va nous permettre de le rendre autonome. A terme ce robot sera capable de se localiser en dynamique dans une piscine et d'y repérer différents objets comme une boule rouge ou un pneu.

-
- i *Les drones se jettent à l'eau* (http://www.defense.gouv.fr/dga/les_drones_se_jettent_a_l_eau)
 - ii *La France envoie un avion, une frégate et un robot sous-marin à Charm el-Cheikh*
(http://french.peopledaily.com.cn/french/200401/05/fra20040105_64756.html)
 - iii http://www.dstl.gov.uk/news_events/competitions/sauce/index.php
 - iv <http://www.radiospares.fr/>
 - v <http://www.lecma-rc.com/>
 - vi <http://www.acmesystems.it/>
 - vii <http://www.linuxfromscratch.org/>
 - viii *Linux embarqué*, Pierre Fichoux, Editions Eyrolles, 2006
 - ix <http://www.labjack.com/>
 - x <http://www.keller-druck.ch/french/homef/hmf.html>
 - xi http://www.cadden.fr/fr--centrales_inertielles-centrales_inertielles-mti--111-4-16-32.html
 - xii <http://www.tritech.co.uk/products/products-miniking.htm>