

# **Point de la situation des travaux engagés pour la construction d'un robot sous-marin pour le concours SAUC'E (fourniture 2 associée au contrat MRIS 2006-2009)**

ENSIETA

## ***L'essentiel***

**La réalisation d'un robot sous-marin autonome encourage les jeunes ingénieurs à réfléchir aux technologies sous-marines futures et vise à réaliser des missions autonomes réalistes. Son élaboration implique un approfondissement des connaissances dans des domaines aussi variés que la mécanique, l'électronique et l'informatique.**

## ***Résumé***

Les étudiants de l'ENSIETA doivent suivre un projet de type industriel durant les six derniers mois de leur deuxième année d'étude. C'est dans ce cadre que 5 élèves (Bardel Zoé, Burnouf Emmanuel, Fromentin Maxime, Gabillard Adrian, et Tagne Steve) poursuivent la construction d'un robot sous-marin autonome, dont la construction a débuté en 2006. Les élèves de la promotion précédente leur ont ainsi légué un sous-marin télé-opérable, robuste et possédant un éventail de capteurs opérationnels. Ce robot a pour objectif non seulement de participer au concours européen SAUCE (Student Autonomous Underwater Competition – European), mais il est aussi le support de projets de recherche dans les domaines de la vision sous-marine et de la localisation dynamique embarquée.

## ***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'obstacles<sup>i</sup>... 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'épaves<sup>ii</sup>,...), 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 au concours organisé par le MOD<sup>iii</sup> (équivalent britannique de la DGA), un groupe d'étudiants de deuxième année de l'ENSIETA, encadrés par des professeurs et des thésards, reprend le prototype de robot sous-marin autonome qui a été entrepris par les élèves de l'année précédente. Celui-ci doit être capable de se localiser dans une piscine, d'y repérer différents objets, d'interagir avec certains d'entre eux et d'en établir une cartographie. Pour pouvoir réaliser la totalité de ces missions, le robot est équipé d'un sonar et d'une centrale inertielle (afin de se localiser) et de deux webcams (afin de repérer les différents objets). Par ailleurs l'autonomie implique une technologie et une intelligence de calcul poussées, c'est pourquoi le sous-marin est doté d'un PC embarqué miniaturisé de pointe.

Le robot a subi ainsi un certain nombre de modifications et cet article a pour but de présenter les différents choix techniques qui ont conduit à l'obtention du sous-marin actuel.

. Nous présenterons d'abord les changements de l'architecture mécanique du sous-marin, puis de son architecture électronique et nous conclurons en donnant brièvement l'état d'avancement des programmes informatiques.

## 2. Modification de l'Architecture mécanique

### a) Architecture externe et étanchéité

- Le choix du tube en aluminium s'impose par sa grande résistance à la pression, son amagnétisme, sa résistance à la corrosion, et la facilité d'établir un environnement étanche. Nous avons décidé de réduire ce tube en aluminium qui constitue la base du robot sous-marin d'environ un tiers de sa longueur. Il est ainsi passé d'un tube de 1 mètre de longueur à un tube de 72cm.

Ce choix s'explique principalement pour des raisons pratiques : en effet avec cette nouvelle longueur, le sous-marin peut être aisément transporté dans un véhicule classique ce qui n'était pas le cas précédemment. Par ailleurs son poids a été réduit de 0,64 kg.



*figure 1 : Sous-marin année 2006-2007*



*Figure 2 : Sous-marin année 2007-2008, réduit de 1/3.*

- La fermeture et la fixation des tapes qui permettent l'étanchéité du sous-marin ont aussi été revues. Pour empêcher l'usure du filetage du tube qui serait irréversible, nous avons différencié les vis de fixation et les vis d'extraction par un diamètre différent, et nous avons ajouté l'usage d'un pion de centrage.

## b) Stabilité et propulsion du sous marin

Nous avons choisi de remplacer les 4 propulseurs initiaux dont les caissons étanches avaient été fabriqués par des élèves et incluait donc une part d'infiabilité.

Nous avons opté pour 3 propulseurs « tout faits » provenant d'un constructeur américain spécialisé dans le ROV (**R**emote **O**perated **V**ehicle, terme générique très utilisé dans la marine pour parler des petits sous-marins téléguidés).

- 1 propulseurs vertical permettant de régler la profondeur du sous-marin
- 2 propulseurs horizontaux permettant de régler la vitesse et le cap

Les propulseurs ont été choisis chez SEABOTIX<sup>iv</sup>. Le modèle « SBT150 » utilisé possède les caractéristiques suivantes :

Tension nominale	19,1 V
Puissance maximale	110 W
Consommation au rendement maximum	4,25 A
Longueur	173 mm
Diamètre	90 mm
Poids	700 g

Ceux-ci sont livrés assemblés et nous les alimentons via des contrôleurs électroniques pour plus de sécurité et de souplesse, commandé chez ROBBE<sup>v</sup>.



Figure 3 : Photo d'un des propulseurs fixé au sous-marin.

Nous avons conservé la solution des barres en T en aluminium fixés sur le tube à l'aide de deux colliers (voir schéma figure 4) pour fixer nos propulseurs qui sont alors simplement vissés.

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 et au propulseur vertical.

Le poids de lestage de la quille que nous avons actuellement est d'environ 630 grammes. Nous avons par ailleurs intégré un système de réglage du lest du sous-marin : par l'utilisation de masse en plomb percées que nous ajoutons sur 4 tige fileté placée aux quatre coins du sous-marin, nous parvenons à la zone limite de flottabilité de celui-ci. Ainsi il suffit d'une force de propulsion très faible pour le faire couler, et lorsque le moteur vertical est coupé, le sous-marin remonte de lui-même à la surface.

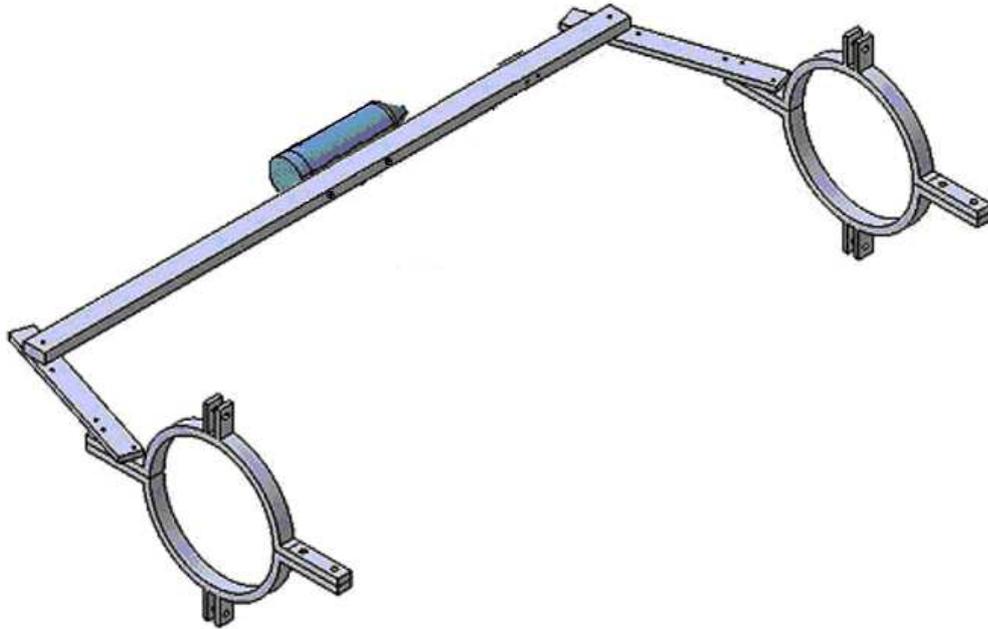


Figure 4 : schéma d'installation des moteurs

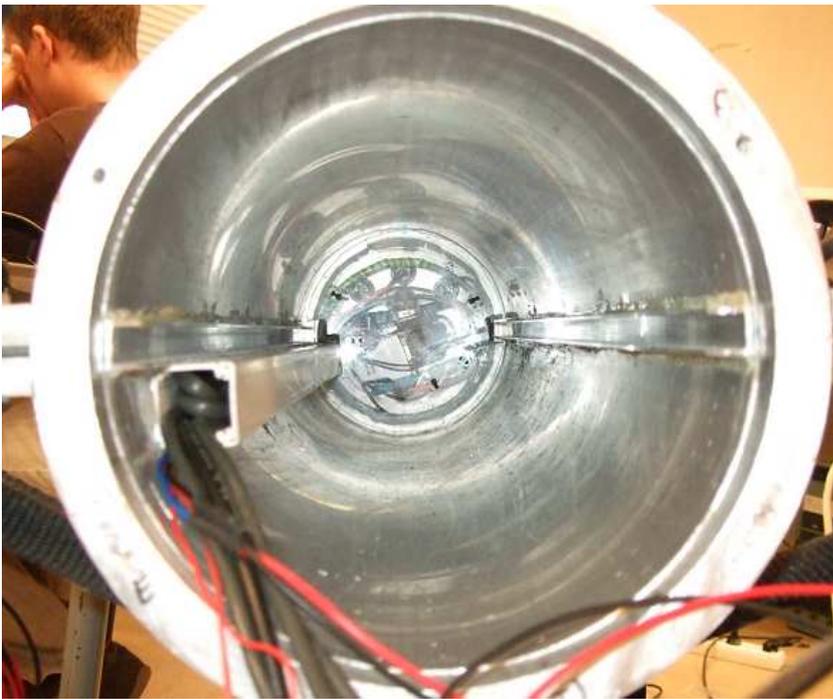
### c) Squelette intérieur

La disposition de l'électronique interne a été entièrement repensée. En effet les contraintes imposées par l'architecture antérieure étaient trop importantes :

Démontage complexe et long, infiabilité de connectique, usure des composants due aux fixations peu robustes, accès trop restreint à des composants essentiels (carte mère, batteries...).

Notre première modification a été l'inclusion d'une rainure à l'intérieur du cylindre. Nous avons fixée des réglettes en U à la colle aluminium. Grâce à celle-ci nous pouvons désormais faire glisser la plaque de plexiglas de 6mm qui sert de support de base à l'architecture interne.

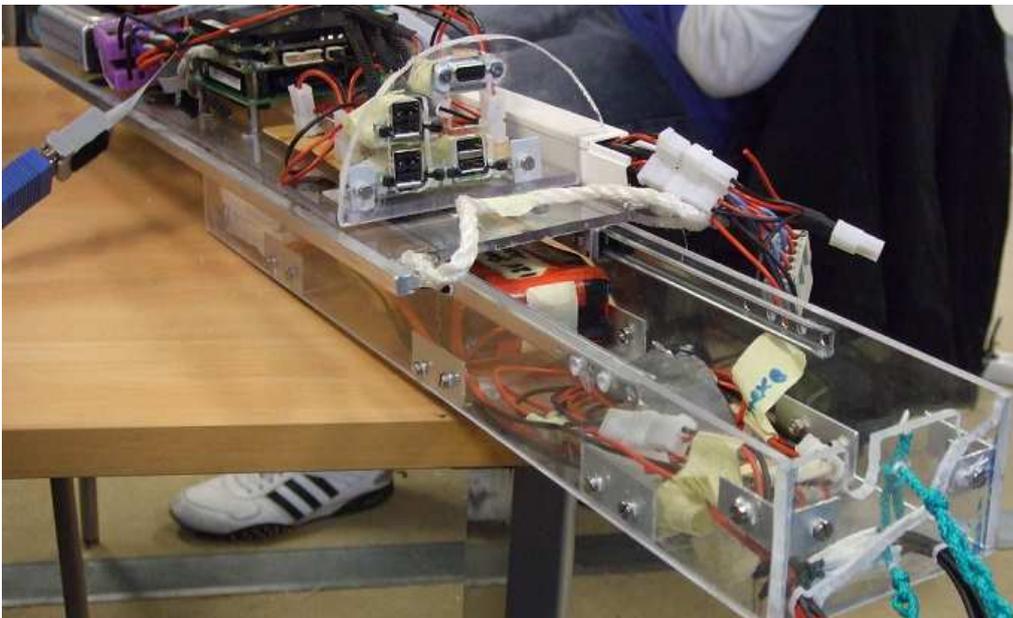
Nous voulions par ailleurs faciliter le démontage / remontage du sous-marin, qui était facteur d'une perte importante de temps et de fiabilité. Pour cela nous avons choisi de limiter fortement la nécessité d'ouverture de l'une des tapes qui ferment le cylindre. Par le truchement d'un guide en pvc fixé sous l'une des rainures nous avons ramené l'ensemble de la connectique de la tape avant jusqu'à la tape arrière. Désormais il n'est plus nécessaire de démonter les deux tapes pour ouvrir le sous-marin et l'on peut accéder à toutes les connectiques à partir de la tape arrière.



*Figure 5 : photo de l'intérieur du tube du sous-marin : rainure et guide et fils.*

Nous avons ensuite décidé d'avoir un accès facilité aux différentes batteries qu'utilise le sous-marin (voir partie *alimentation* pour plus de détails). Par exemple nous voulions pouvoir remplacer une batterie ou vérifier son niveau de charge sans avoir besoin de démonter l'intégralité du sous-marin. Nous avons donc réalisé et intégré un système de tiroir fixé sous la plaque de plexiglas.

Enfin nous avons ajouté un support vertical suivant le contour du cylindre qui permet d'interfacer les composants avec la carte mère (principalement ports USB).



*Figure 6 : photo du support de l'électronique du sous-marin, avec le tiroir sorti.*

### 3. Modification de l'architecture électronique

Les évolutions électroniques du sous-marin sont essentiellement qualitatives. En effet l'architecture et le fonctionnement repose sur le même schéma de base, que nous rappelons en figure 7.

Certains des composants présents sur la version précédente du robot ont été considérés comme optimaux. Nous ne pensons trouver mieux en rapport qualité / prix, fiabilité et simplicité et c'est pourquoi nous avons conservé :

- le capteur de pression permettant de déterminer la profondeur.
- le sonar et la centrale d'attitude permettant de le localiser par rapport aux bords de la piscine.
- la carte labjack qui nous permet de commander les cartes de puissance par le biais de signaux PWM.
- les cartes de puissance qui alimentent nos moteurs.

Cependant nous avons choisi d'optimiser le reste des éléments qui apparaissent sur la figure 7 à savoir :

- les propulseurs (voir 2.b)
- les caméras qui sont maintenant à haute résolution.
- le PC embarqué, auquel sont notamment allouées les tâches de calcul de localisation et de traitement d'images.

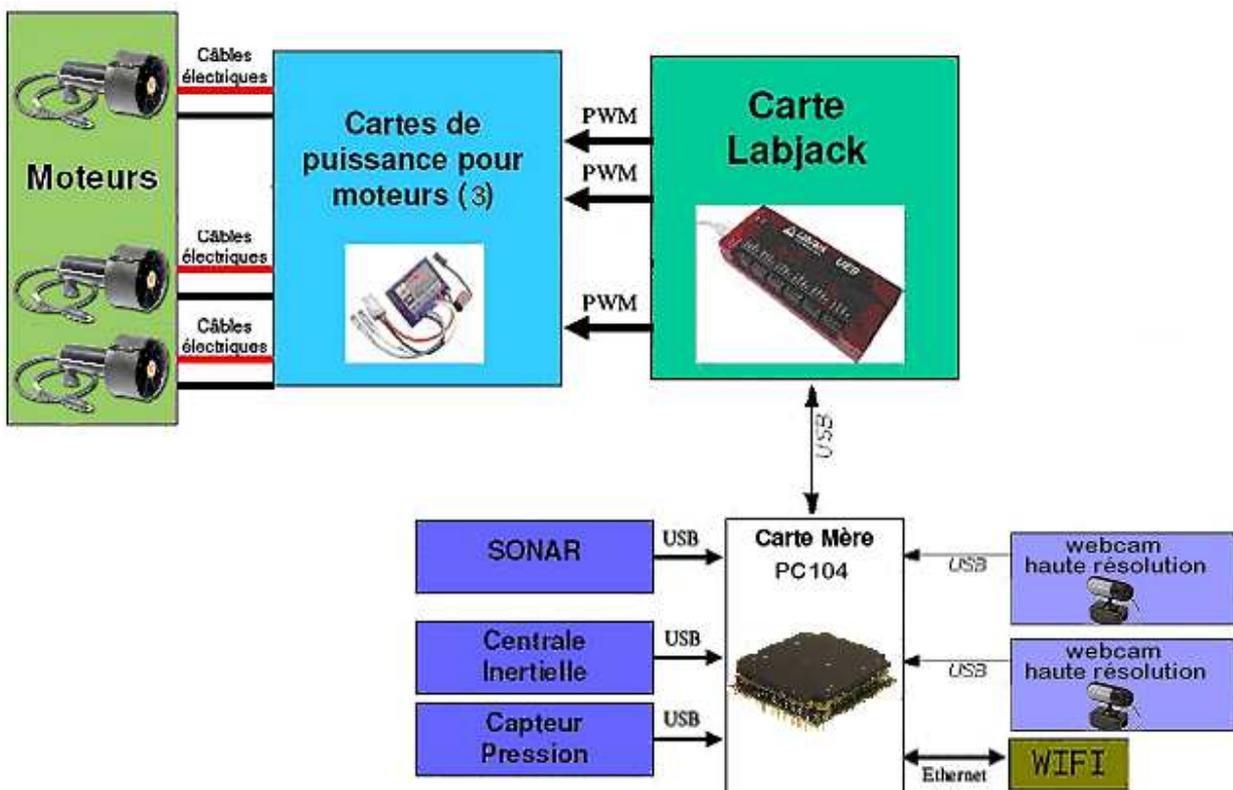


Figure 7 : Organigramme des entrées-sorties, cartes et capteurs utilisés

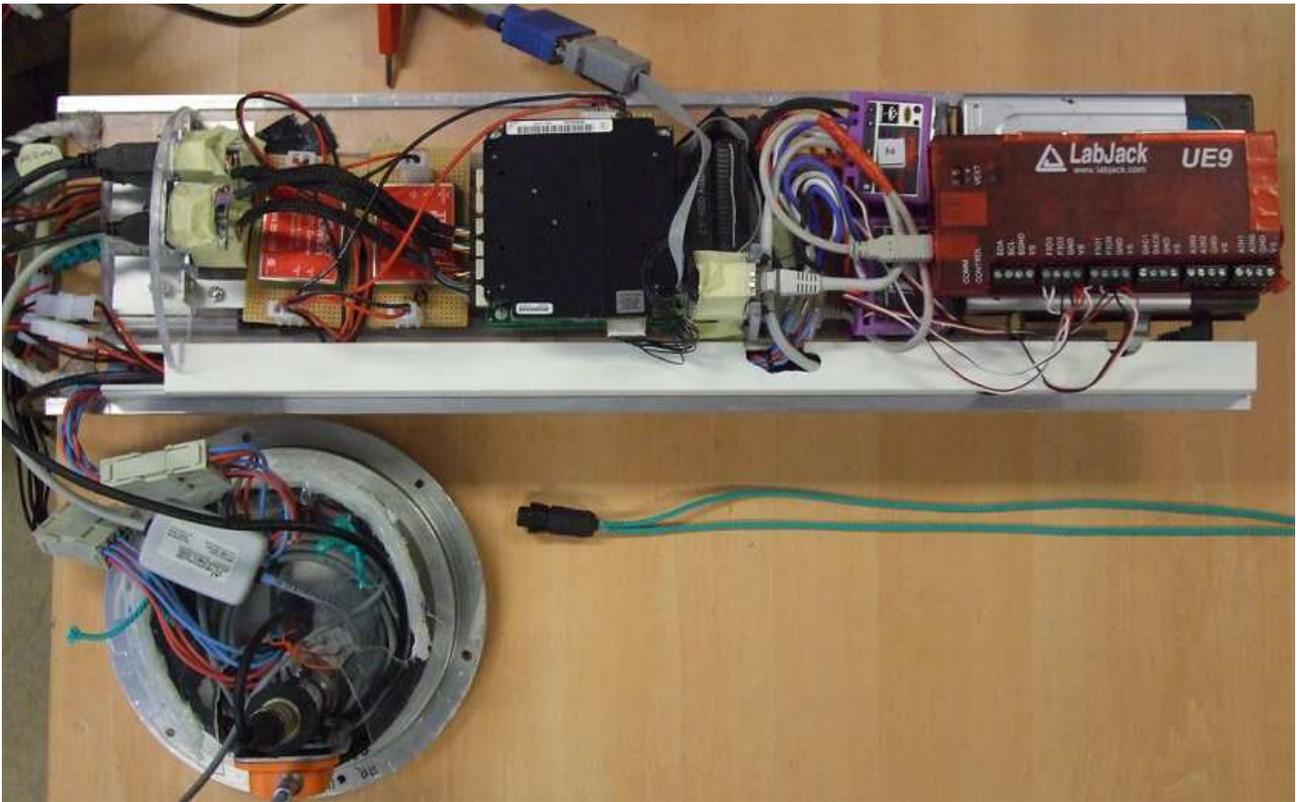


Figure 8 : Implantation de l'électronique à l'intérieur du sous-marin

## a) Alimentation

Le circuit d'alimentation est divisé en trois parties :

- La partie puissance.

Les moteurs sont alimentés par les 12 V qui sortent de nos batteries, la protection étant assurée par les cartes de puissance.

- La partie numérique qui alimente le PC 104 :

L'un des intérêts principaux pour avoir choisi le PC104 est de pouvoir l'alimenter avec seulement un voltage de 5V, sachant qu'il existe aussi la possibilité de l'alimenter avec l'alimentation ATX mais qui nécessite donc de créer plus de tensions différentes (+5V ; -5v ; +3,3V ; -3,3V ; -12V ; +12V). L'alimentation en 5V se fait sur un connecteur appelé J9. Pour l'alimenter, il suffit de relier la sortie 5V stabilisée aux pins 1 (GND), et 2 ou 8 (VDD). L'alimentation 5V stabilisée provient pour notre part de la carte d'alimentation qui fournit donc du 5V en stabilisé et une intensité de 5A maximum. Aussi, la puissance est fournie par une batterie (bloc de pile fournissant du 12V) à la carte d'alimentation.

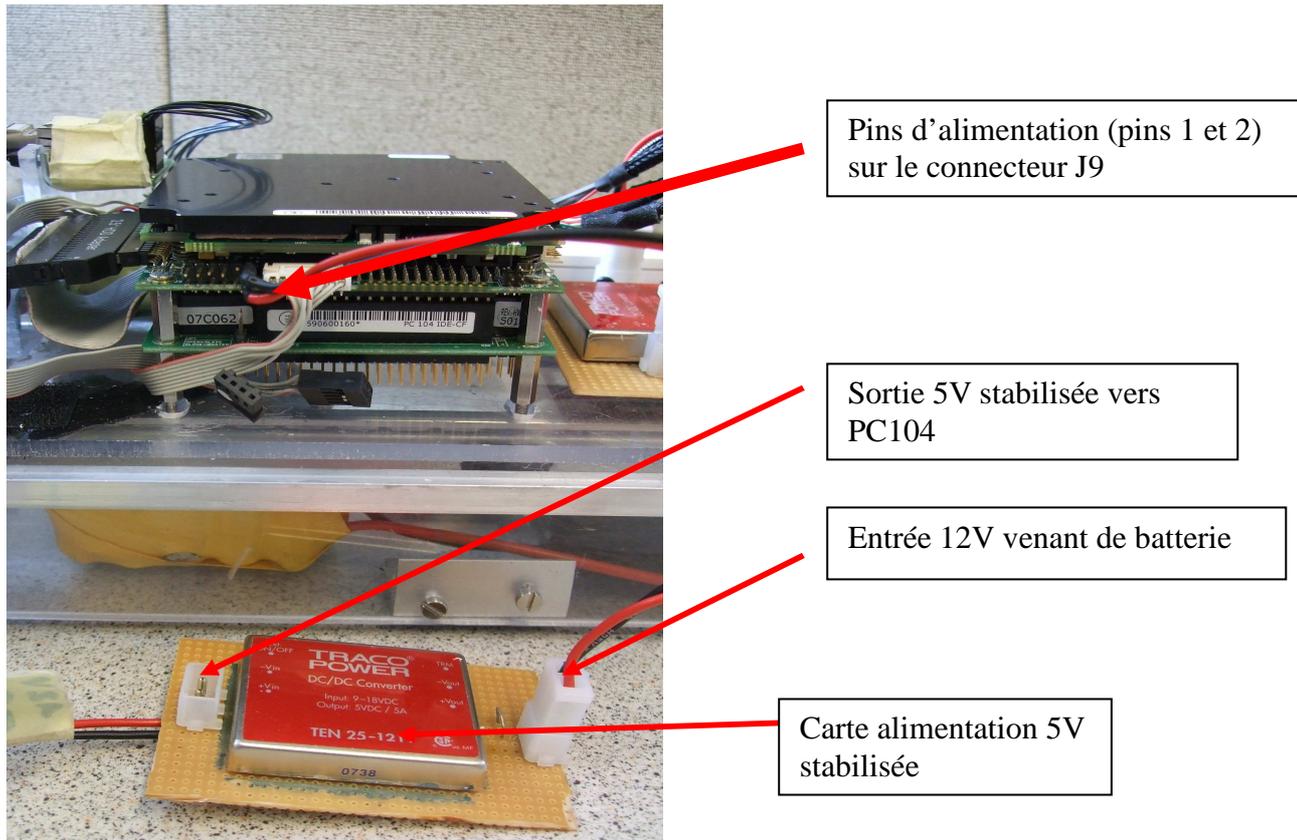


Figure 8 : Descriptif de l'alimentation du PC104.

La carte de puissance accepte des tensions comprises entre 9V et 18V donc la tension venant des batteries convient très bien. Le PC lui accepte des tensions comprises entre 4,75V et 5,25V. C'est pourquoi nous utilisons une carte d'alimentation stabilisée pour éviter d'une part les chutes de tension et aussi pour éviter de « griller » le PC104.

Value	CPU-1472	CPU-1482
<b>Power supply (VDD)</b>	Nominal: 5.00V Minimum: 4.75V Maximum: 5.25V	Nominal: 5.00V Minimum: 4.75V Maximum: 5.25V
<b>Power consumption</b>	Typical: 9.5 W Maximum: 13.5 W	Typical: 14.5 W Maximum: 18.5 W

L'intensité demandée par le PC104 peut varier jusque 3A lors du boot du PC104. En temps normal, elle est proche de 1A. Il se peut qu'il n'y ait pas assez d'intensité dans ce cas le PC boot en boucle ce qui peut provoquer un dérèglement du BIOS (option keyboard). Ce problème arrive notamment lorsqu'on alimente le PC avec une alimentation stabilisée externe. Pour régler ce problème définitivement, nous pensons nous doter très prochainement d'une carte pouvant fournir une puissance deux fois supérieure, soit 50 Watts.

- Le sonar nécessite quant à lui une alimentation spécifique en 24V. C'est pourquoi nous avons un jeu de batteries spécifiques au sonar ; cette tension n'est pas stabilisée, le sonar ayant une plage de tension assez étendue.

## b) Carte mère embarquée et système d'exploitation

La solution abordable choisie pour le sous-marin 2006-2007 était celle d'une carte mère 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 architecturées 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). Cependant en considérant notre objectif de réduction de la taille du robot, le gain de place pouvait être réalisé principalement au niveau de ce composant. En effet considérant que la taille de ces cartes est de 17x17cm et que le diamètre interne de notre cylindre est lui aussi de 17 cm, on avait alors un facteur limitant à notre architecture mécanique interne.

Nous avons pensé assez vite à une solution de type PC104. Ces PC, très modulaires et de taille excessivement réduite sont tout désignés pour les applications du domaine embarqué, notamment lorsque l'on a besoin d'une force de calcul relativement importante. Le second atout majeur du PC104 est son alimentation ; là où il nous fallait recréer la totalité de la gamme de tensions nécessaires à un PC de salon, le PC104 n'avait besoin que d'une alimentation continue en 5V. Enfin le PC possède des caractéristiques techniques qui n'ont rien à envier à la carte mère précédente.



Figure 9 : Le PC104 CPU-1484de chez EUROTECH

<b>Dimensions:</b> 90 x 96mm	<b>Hauteur:</b> 18.6mm
<b>Alimentation:</b> Single +5V DC	<b>Consommation:</b> 14.5W en moyenne.
<b>Processeur:</b> Intel® Pentium® M 1.4GHz, 2MB L2 cache, 400MHz FSB	
<b>Chipset:</b> Intel® i855GME	
<b>Mémoire système:</b> 512MB DDR, 266MHz (PC2100).	
<b>Systèmes d'exploitation supportés:</b> WinCE®, WinXPE® et Linux®	
<b>BIOS Flash:</b> 1MB Flash EPROM	
<b>Interfaces:</b>	
· IDE ATA 100, Contrôleur de ports séries: 1x RS-232, 1x RS-232/422/485, 4x ports USB 2.0.	
· Gigabit Ethernet (Intel® 82541 chipset), Fast Ethernet (Intel® 82562 chipset)	
· Contrôleur graphique, AC97 audio interface, clavier, souris.	

Bien entendu nous avons décidé de conserver le système d'exploitation linux. Nous utilisons toujours 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.

### c) Commande des propulseurs

Afin de commander les moteurs nous avons utilisé une carte Labjack UE9<sup>vi</sup>. 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 10 : 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.

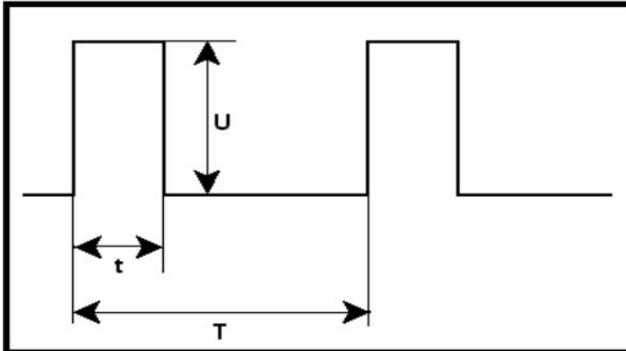


Figure 11 : Principe de fonctionnement du PWM

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  $\mu$ 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 du Wifi (qui nous permet de diriger le sous-marin lors des phases de test). Une « clef » qui est en réalité un de nos connecteurs étanches permet de démarrer le sous-marin ; en effet une fois inséré, le connecteur relie les masses des batteries à celle de nos composants électroniques, déclenchant ainsi leur alimentation.

Par ailleurs nous avons aussi la possibilité de monter très vite un écran d'ordinateur standard ainsi qu'un clavier sur le PC embarqué en cas de problème informatique inopiné.

- *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.

## 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<sup>vii</sup> 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 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. A l'heure actuelle ce périphérique est maîtrisé puisque nous parvenons à asservir le sous-marin. Il maintient sa profondeur par une contrôlabilité de type dit « bang bang » : lorsque la profondeur réelle du robot s'écarte d'une valeur supérieure au seuil fixé, le propulseur vertical est déclenché pendant quelques secondes, de manière à replacer le sous-marin à la profondeur voulue. En pratique, le moteur vertical est très peu exploité, on observe sa mise en route intermittente : la profondeur varie très peu.

- *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<sup>viii</sup>. 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*

Nous utilisons toujours le sonar Tritech Miniking<sup>ix</sup> 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 cette année opté pour un modèle de caméra haute résolution que nous avons pu tester en piscine. Nous les avons ensuite démontés et intégrés dans un boîtier étanche. 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 focale de l'objectif réglé sur l'infini.

## 4. Conclusion

Dans le cadre du concours SAUCE nous avons optimisé le prototype de robot sous-marin qui avait été élaboré en 2006. Nous sommes aujourd'hui capables de le faire se mouvoir via une communication WIFI et de le localiser dans une piscine. L'ensemble des capteurs est aujourd'hui opérationnel (webcams, capteurs de pression, sonar, centrale inertielle) et les programmes de localisation sont en cours de finalisation. Nous développons actuellement les programmes simples de déplacement du sous-marin en autonomie : il peut ainsi se déplacer en ligne droite en suivant un cap indiqué par la centrale inertielle, et connaître sa position à tout instant dans la piscine. Nous développons en parallèle les programmes de traitement d'images : avec la qualité des caméras haute résolution, nous sommes capables de détecter couleurs et contours des objets dans l'eau de la piscine. Enfin nous réalisons aussi une interface graphique bien plus agréable que la précédente (bibliothèque QT, programmation C) qui nous permet à la fois de contrôler tous les éléments critiques du sous-marin (vitesse et sens des propulseurs, profondeur, température, tangage du sous-marin, données sonar, image Webcam, temps batterie) mais aussi de lancer les différents programmes test d'autonomie.

---

i *Les drones se jettent à l'eau* ([http://www.defense.gouv.fr/dga/les\\_drones\\_se\\_jettent\\_a\\_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](http://french.peopledaily.com.cn/french/200401/05/fra20040105_64756.html))

iii [http://www.dstl.gov.uk/news\\_events/competitions/sauce/index.php](http://www.dstl.gov.uk/news_events/competitions/sauce/index.php)

iv <http://www.seabotix.com/>

v <http://at.robbe-online.net/>

vi <http://www.labjack.com/>

vii <http://www.keller-druck.ch/french/homef/hmf.html>

viii [http://www.cadden.fr/fr--centrales\\_inertielles-centrales\\_inertielles-mti--111-4-16-32.html](http://www.cadden.fr/fr--centrales_inertielles-centrales_inertielles-mti--111-4-16-32.html)

ix <http://www.tritech.co.uk/products/products-miniking.htm>