H160: un véhicule sous-marin autonome dédié à l'exploration des eaux peu profondes

Jean-Mathias Spiewak, Bruno Jouvencel, Philippe Fraisse, Lionel Lapierre

▶ **To cite this version:**

Jean-Mathias Spiewak, Bruno Jouvencel, Philippe Fraisse, Lionel Lapierre. H160: un véhicule sous-marin autonome dédié à l'exploration des eaux peu profondes. CMM: Caractérisation du Milieu Marin, Oct 2006, Brest, France. pp.24. lirmm-00109554

HAL Id: lirmm-00109554

https://hal-lirmm.ccsd.cnrs.fr/lirmm-00109554

Submitted on 24 Oct 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

H160 : un véhicule sous-marin autonome dédié à l'exploration des eaux peu profondes

Spiewak[1][2], **Jouvencel**[1], **Fraisse**[1], **Lapierre**[1]
[1] *Département Robotique, LIRMM, 161 rue Ada, 34090, Montpellier, France*
E-mail: {spiewak,jouvencel,fraisse,lapierre}@lirmm.fr
[2] *ECA-HYTEC, 501 rue Croix de Lavit, 34090, Montpellier, France*

SHORT ABSTRACT: *This paper focuses on the design and control of a new Autonomous Underwater Vehicle (AUV) named H160. The first prototype of this AUV has been designed through a collaboration of two partners, which are the LIRMM (Montpellier Laboratory of Computer Science, Robotics and Microelectronics) and the french company ECA-HYTEC (specialist in the design and manufacture of remote controlled systems in "hostile" environments). We present an overview of this project regarding the development of this vehicle including the hardware architecture, modelling and control. In addition, the first experimental results relying on real experimental conditions are displayed and commented.*
Keywords: *AUV, Vehicle description, Shallow water, Sea trials.*

RÉSUMÉ COURT: *Un nouveau véhicule sous-marin autonome appelé H160 est présenté dans cet article. Le premier prototype de cet AUV a été réalisé au travers d'une collaboration entre 2 partenaires, qui sont le LIRMM (Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier) et la société ECA-HYTEC (spécialiste dans la fabrication et la production de systèmes téléopérés pour environnements hostiles). Nous présentons ici une vue générale du véhicule comprenant la description de l'architecture matérielle, la modélisation et la loi de commande. De plus, les premiers résultats expérimentaux reposant sur de réelles conditions expérimentales sont présentés et commentés.*
Mots-clés: *AUV, Description de véhicule, Eaux peu profondes, Essais en mer.*

1 INTRODUCTION

Aujourd'hui, les robots sous-marins font partie intégrante des équipements scientifiques afin d'explorer les mers et les océans. Beaucoup d'exemples ont montré que les ROVs (Remotely Operating Vehicles) ou véhicules téléopérés, et les AUVs (Autonomous Underwater Vehicles) sont utilisés dans de nombreux domaines et ce, pour diverses applications comme l'inspection, la cartographie ou encore la bathymétrie.
Cependant, nous pouvons distinguer une *profondeur limite* pour les différents types d'engins sous-marins autonomes existants. En effet, à partir de 300 mètres, la structure, les dimensions et les caractéristiques de ces véhicules changent. Nous avons, d'un côté, les AUVs grands fonds, comme le Hugin 3000 de Kongsberg Simrad, le Sea Oracle de Bluefin Robotics ou encore l'Alistar 3000 d'ECA, qui peuvent atteindre des profondeurs de 3000 mètres, qui ont une très grande autonomie, des dimensions non négligeables et un poids qui requière une importante logistique. D'un autre côté, des AUVs comme le Remus d'Hydroid ou le Gavia d'Hyfmind, avec beaucoup moins d'autonomie, mais des dimensions et une logistique réduites, et avec leurs capacités de modularité semblent être l'outil parfait pour l'exploration des eaux peu profondes.
C'est dans ce contexte que le LIRMM et la société Eca-Hytec sont devenus partenaires pour développer le premier prototype de l'AUV H160. En 2004, notre choix initial était basé sur un petit engin d'une

vitesse comprise entre 2 et 4 noeuds pour une autonomie de 4 heures, avec une logistique réduite. Ce prototype a été développé pour naviguer et se positionner à l'estime et au GPS. A la surface, la torpille doit être capable de transmettre les données de missions. Les applications visées sont l'inspection, la bathymétrie, l'acquisition de données chimiques ou encore d'images sonar et vidéo. L'engin aura aussi la possibilité de naviguer entre 1 et 2 mètres de profondeur (en étangs ou lacs) avec un angle de tangage quasi nul.
Une description générale du H160 sera détaillée dans la partie suivante, comprenant les capteurs, la structure mécanique et l'architecture logicielle. Le troisième paragraphe décrit rapidement le modèle et la loi de commande du véhicule. Différents essais en mer seront exposés dans le quatrième paragraphe. Enfin, le cinquième paragraphe conclue ce travail et propose des perspectives concernant l'amélioration du véhicule.

2 DESCRIPTION DU VEHICULE

Le H160 est un véhicule de type torpille de petite taille et de faible coût dédié aux applications en eaux peu profondes; jusqu'à 160 mètres. Le véhicule mesure 1,80m de long pour un diamètre de 20cm et un poids de 50kg (Fig.1).

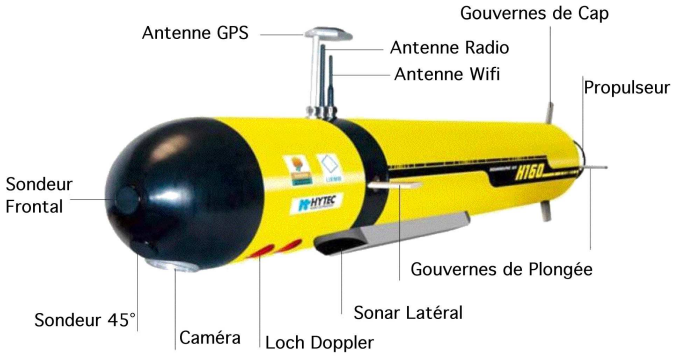


Fig. 1: Vue générale du H160

Grâce à sa petite taille, les essais en mer demandent une logistique réduite au minimum à 2 personnes et un bateau à moteur. Le prototype est capable de réaliser une mission d'au moins 3 heures tout en maintenant sa vitesse à 3 noeuds. Sa flottabilité positive permet à la torpille de remonter à la surface après chaque fin de mission. Elle possède un propulseur arrière, une paire de gouvernes de cap et 2 paires de gouvernes de plongée situées à l'avant et à l'arrière du véhicule. Le H160 est alimenté par une batterie $48V/16Ah$ de type NiMH, dispose d'un moteur à courant continu 230W et de 4 servomoteurs 30N.cm pour le contrôle des gouvernes.
La capacité de la torpille à plonger de la surface tout en maintenant son angle de tangage quasi nul, grâce à sa paire de gouvernes de plongée avant, constitue la principale caractéristique de cet engin.

2.1 Capteurs

Le H160 est équipé de capteurs de navigation haute performance (Fig.1). Une centrale d'attitude (3DM-G, Microstrain) comprenant un magnétomètre 3 axes, un gyromètre 3 axes et un accéléromètre 3 axes fourni les angles d'Euler, les vitesses et accélérations de rotation. Un Loch Doppler de RD Instruments nous offre les vitesses linéaires (par rapport au fond de la mer et ce jusqu'à 30 mètres), ainsi que les angles d'attitude du véhicule. Sa position à la surface est déterminée par GPS (Lassen SK8, Trimble). Sa profondeur est mesuré par 2 capteurs; un premier jusqu'à 60 mètres (meilleure précision en eaux peu profondes) et un deuxième jusqu'à 160 mètres.
Concernant les capteurs scientifiques, la torpille possède également un Sidescan Sonar de marque Tritech, un capteur CTD (Conductivity, Temperature and Depth) de marque ADM qui donne la conductivité, la température ainsi que la profondeur, 3 sondeurs pour le suivi de fond ou l'évitement d'obstacles (un situé vers l'avant, un regardant à $45°$ vers le bas et un dernier dirigé vers le bas). Une caméra CCD avec éclairage par LEDs pulsées est également installée dans le nez du véhicule.

Les liens Radio et Wifi sont également disponibles pour transmettre les données de missions et pour communiquer avec le ”PC missions”.

2.2 Structure mécanique

La torpille est un véhicule de forme cylindrique comme montrée sur la Figure 2. Sa structure est principalement composée d'aluminium avec un diamètre de 20cm et 1,80m de longueur.

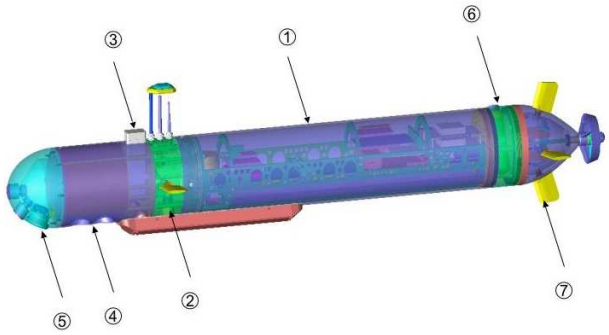


Fig. 2: Structure mécanique du H160

Nous pouvons détailler le prototype en 7 parties:

1. Le compartiment électronique, composé de 2 étages, est la partie principale. Le premier étage accueille la batterie, tandis que le second est composé de toutes les cartes embarquées (capteurs, puissance, pc, ...). Cette partie est évidement étanche;
2. Cette section, étanche également, est constituée des antennes GPS, Radio et Wifi, mais aussi des gouvernes de plongée avant;
3. Le capteur CTD et le Sidescan sonar sont dans une partie humide;
4. Le Loch Doppler est situé dans une partie étanche;
5. Le nez du véhicule, également étanche, comprend la caméra CCD et 2 sondeurs;
6. Derrière la partie principale, nous trouvons les capteurs de pression et un pinger acoustique de secours dans une partie humide;
7. Enfin, le propulseur, les gouvernes de cap et de plongée, constituent la partie arrière.

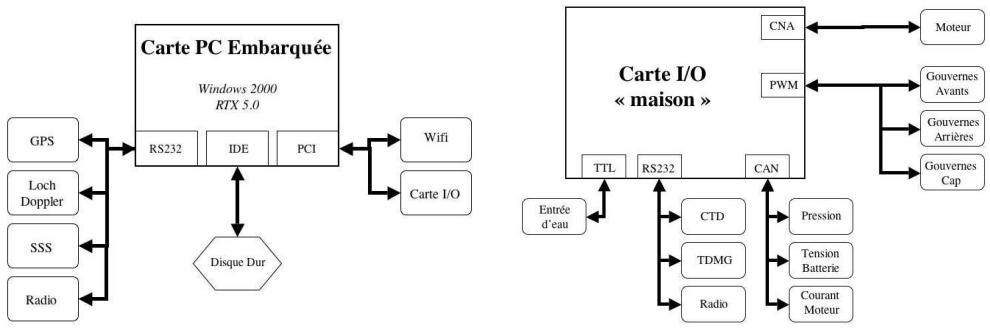
Un tube en aluminium vient étanchéifier la partie principale. La partie arrière, elle, est simplement vissée sur ce tube afin de permettre un accès facile et rapide aux batteries.

2.3 Architecture matérielle

La plate-forme matérielle, développée pour le H160, est basée sur une architecture centralisée autour d'une carte PC embarquée avec un processeur Pentium III cadencée à 1,26GHz (Fig.3(a)).
Windows 2000 et RTX 5.0 sont utilisés pour le temps réel. Les sorties séries RS232 de la carte (4 au total) sont dédiés aux capteurs suivants: GPS, Loch Doppler, Sonar latéral et Radio. La carte Wifi et la carte entrées/sorties (carte I/O) faite ”maison” sont connectés sur une extension du bus PCI.
Comme le montre la Figure 3(b), la carte entrées/sorties ”maison” possède 2 liens RS232 pour le capteur CTD et la centrale d'attitude. Aussi, une sortie TTL pour les entrées d'eau, un convertisseur NA pour le propulseur, 3 convertisseurs AN pour la pression, la tension batterie et le courant moteur et 3 sorties PWM pour les gouvernes avants, arrières et de cap.

2.4 Commande à distance et Communication

Nous avons opté pour travailler directement sur le PC embarqué de la torpille via Wifi utilisant le logiciel ”VNC”. VNC signifie Virtual Network Computing. C'est un logiciel de commande à distance gratuit, qui nous permet d'avoir une image du bureau du PC embarqué et ainsi d'agir sur la torpille (le serveur) utilisant un programme simple (le client) sur notre ”PC missions”.



(a) Carte PC Embarquée (b) Carte I/O "Maison"

Fig. 3: Architecture matérielle

3 MODELISATION ET LOI DE COMMANDE

3.1 Modèles linéarisés

Nous utilisons un modèle linéarisé avec une commande en sliding mode pour controler la torpille dans les deux plans vertical et horizontal.

A partir d'un modèle hydrodynamique complet [1], [2] basé sur les équations non linéaires du mouvement d'un solide à 6 degrés de liberté, nous avons calculé un modèle linéaire décrivant le comportement de la torpille pour des petits mouvements autour d'une trajectoire horizontale. Cependant, n'ayant pas eu la possibilité d'obtenir les coefficients hydrodynamiques en utilisant un bassin des carènes, nous avons calculé les paramètres du modèle à l'aide d'équations empiriques ou encore estimé ceux que l'on ne pouvait pas déterminer.
En accord avec les notations de [5] et considérant un repère fixé à la torpille, où les vitesses du véhicule sont définies, et un repère inertiel, où les positions du véhicule sont spécifiées, nous pouvons donner les vecteurs d'état X_1 and X_2 des modèles linéarisés respectivement pour le cap et la plongée:

$$X_1 = [v \quad r \quad \psi]^T \tag{1}$$

où v représente la vitesse de glissement (embardée), r le lacet et ψ l'angle de cap et,

$$X_2 = [w \quad q \quad \theta \quad z]^T \tag{2}$$

où w représente la vitesses de descente (pilonnement), q le tangage, θ l'angle de tangage et z la profondeur.

Les modèles suivants sont respectivement utilisés pour les deux plans horizontal et vertical:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 \\ c_{21} & c_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_h \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & a_{43} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_b \\ \delta_s \end{bmatrix} \tag{4}$$

Les entrées de commande sont définies par les angles appliqués aux gouvernes, avec δ_h pour les gouvernes de cap, δ_b and δ_s pour les gouvernes de plongée avants et arrières.
Les valeurs numériques des coefficients hydrodynamiques des modèles linéaires sont donnés dans le Tableau 1.

3.2 Loi de Commande

La technique du Sliding Mode est implantée dans le H160 pour contrôler le cap et la plongée. De plus ample détails sont donnés par [3] et [4] sur la description du Sliding Mode et comment obtenir

Table 1: valeurs numériques des coefficients hydrodynamiques des modèles linéaires

c_{11}	-0,4019	a_{11}	-0,4019
c_{12}	-0,1319	a_{12}	0,1319
c_{21}	-0,3552	a_{21}	0,3555
c_{22}	-1,1813	a_{22}	-1,1823
d_1	0,2080	a_{23}	-0,2478
d_2	-0,5830	a_{43}	-1,0
		b_{11}	-0,1319
		b_{12}	-0,4019
		b_{21}	-1,1813
		b_{22}	-0,3552

les lois de commande pour l'AUV.
Un fait important à noter est que le contrôle en Sliding Mode va renforcer la robustesse de la commande vis à vis de la dynamique non modélisée et des perturbations. Cependant, un inconvénient appelé "chattering" ou réticence (mode haute fréquence non modélisé) peut apparaître et provoquer une usure des actionneurs et également dégrader les performances du système.
Les équations suivantes représentent la surface de glissement σ_h et la loi de commande δ_h pour le contrôle du cap:

$$\sigma_h = h_1 v + h_2 r + h_3(\psi - \psi_{des}) \tag{5}$$

$$\delta_h = k_1 v + k_2 r + \eta_h tanh(\sigma_h/\phi_h) \tag{6}$$

Les équations suivantes représentent la surface de glissement σ_d et la loi de commande δ_d pour le contrôle de la plongée:

$$\sigma_d = d_1 w + d_2 q + d_3 \theta + d_4(z - z_{des}) \tag{7}$$

$$\delta_d = k_{11} w + k_{22} q + k_{33} \theta + \eta_d tanh(\sigma_d/\phi_d) \tag{8}$$

La fonction de saturation $tanh$ est choisi ici à la place de la fonction $sign$ du fait des propriétés de souplesse dépendant du paramètre ϕ et aussi pour réduire l'effet de réticence.
Une particularité du H160 précédemment souligné est son aptitude à plonger avec un angle de tangage quasi nul grâce à ses gouvernes de plongée avants. D'un point de vue commande, les gouvernes avants contrôlent la profondeur du véhicule et les gouvernes arrières contrôlent l'angle de tangage.

4 EXPERIENCES - ESSAIS EN MER

4.1 Brest

Le H160 a été déployé dans le port militaire de Brest et dans la baie de Morgat, près de Brest, en juin 2005. Plusieurs objectifs ont été définis pour plusieurs missions.
Le premier jour, l'objectif de la mission était d'accomplir une trajectoire en râteau à 10 mètres de profondeur afin de détecter avec le sonar latéral de vieilles mines sous-marines connues. Notre trajectoire était alors définie par plusieurs "setpoints" successifs de 200 secondes de longueur et 20 secondes de large pour une durée totale de 1740 secondes (29 minutes). Nous avons lancé la torpille plein Nord avec une vitesse constante de $1,5m/s$ (3 noeuds) et un courant Sud, mesuré par le démineur. La trajectoire réalisée par la torpille utilisant des données estimées est montrée Fig. 4.

D'après ce graphique, il est facile de voir l'effet du courant sur la trajectoire de la torpille. De plus, pendant cette mission, la torpille ne disposait pas de données estimées (pas de navigation à l'estime). La profondeur est montrée Fig. 5(a) et nous pouvons constater que la profondeur désirée de 10 mètres est bien atteinte. Cependant, pour expliquer la présence d'une large bande autour de la profondeur désirée, un agrandissement de la figure précédente est réalisé Fig. 5(b). Nous pouvons, en effet, voir le phénomène de réticence , du à la loi de commande utilisant le régime glissant, bien que la précision du véhicule est d'environ $\pm 0,5$ mètres.

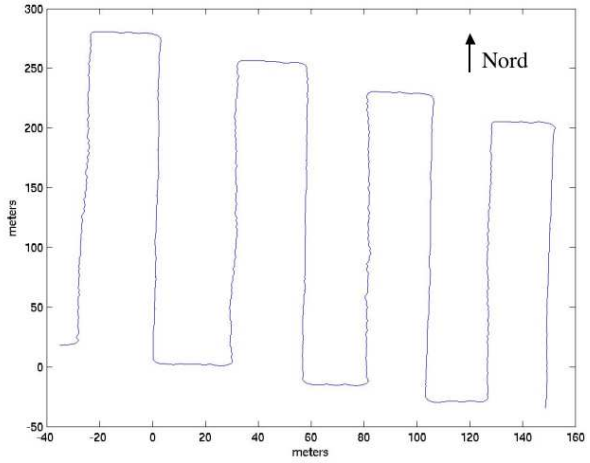
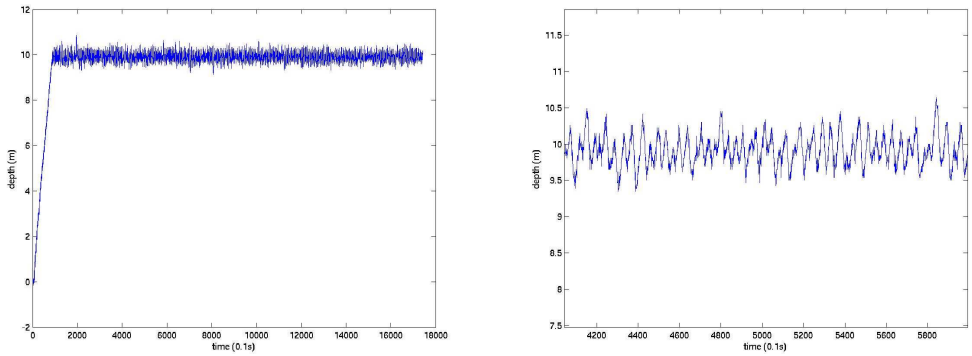


Fig. 4: Trajectoire en rateau



(a) Profondeur de la torpille

(b) Zoom sur la profondeur

Fig. 5: Données du capteur de profondeur

4.2 La Source d'eau douce de La Vise

Une des applications du H160 est la reconnaissance de sources d'eau douce à l'aide de son capteur CTD. Le but de ces missions est d'identifier et d'évaluer le panache d'eau douce provenant de sources sous-marines, en particulier dans l'étang de Thau, qui situé entre Montpellier et Sète en bordure de mer Méditerranée.
Pour information, une source sous-marine peut déverser de quelques litres par seconde jusqu'à des mètres cubes par seconde d'après la littérature. Une grande quantité de cette eau douce, ou légèrement salée, présente dans la mer semble etre une ressource possible en eau pour les régions justement en manque d'eau potable.

Le véhicule, ici, doit réaliser plusieurs trajectoires au dessus de la source à différentes profondeurs tout en enregistrant la conductivité, la température et la profondeur afin de pouvoir caractériser la panache de la source.
Fig. 6 montre la source d'eau douce de La Vise dans l'étang de Thau et Fig. 7 donne une vue 3D de la source qui peut s'identifier à un cône de 80 mètres de diamètre commençant à 2 mètres de profondeur se terminant à 36 mètres sous la surface.

Fig. 6: Photo de la source de La Vise (M.Bakalowicz)

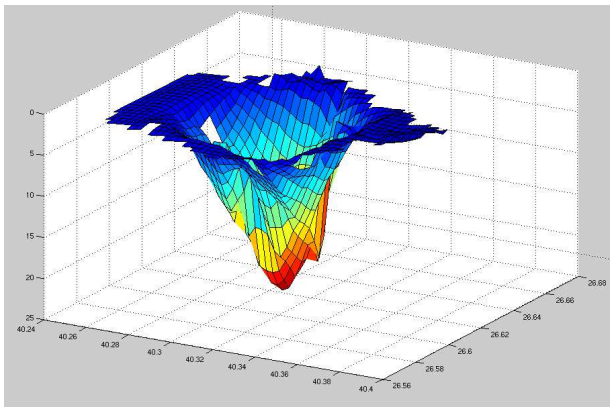


Fig. 7: Vue 3D de la source de La Vise

5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La première version du prototype H160 a été achevée et validée. Les premiers résultats expérimentaux que nous avons obtenus nous permettent de penser que les objectifs initiaux ont été atteints; en particulier en termes de transportabilité, navigation et performances. Cependant, ces premiers résultats nous donnent également des informations intéressantes sur le comportement générale de la torpille; ce qui nous conduit à prévoir l'amélioration du véhicule concernant la fiabilité et l'efficacité du H160.

Ces modifications et améliorations sont en cours de développement. Ils concernent la structure mécanique et l'architecture informatique.
Concernant la structure mécanique du véhicule, des changements sont programmés (Fig.8). Une nouvelle tête est en cours de fabrication, comprenant un sonar à balayage pour le suivi de pipelines et un modem acoustique dans l'intention de développer une flottille d'AUVs et travailler sur la coordination multi-véhicules. De plus, le H160 gardera tous les capteurs déjà présents dans la torpille : le sonar latéral, la capteur CTD, la caméra et les sondeurs acoustiques. Etant donné que la longueur de la torpille sera augmentée et qu'une section humide disparaîtra du fait de cette nouvelle tête, un propulseur plus puissant est prévu pour donner à la torpille une vitesse d'au moins 2 noeuds.
Concernant l'architecture informatique, nous étudions la possibilité d'évoluer vers une architecture distribuée. L'idée est de garder notre carte PC embarqué qui devra gérer les capteurs de navigation; le loch doppler, la centrale d'attitude et le capteur de pression. Une autre carte, basée sur du PC104, devra alors gérer les capteurs scientifiques qui ne demandent pas de traitements en ligne pour nos applications; le sonar latéral, le capteur CTD et la caméra. Enfin, le modem acoustique, les sondeurs

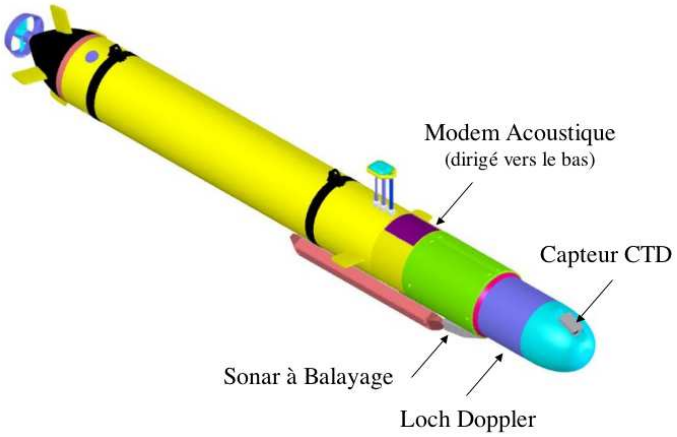


Fig. 8: H160 new mechanical structure

acoustiques, le sonar à balayage, le GPS et la radio, lesquels ont besoin de traitements en ligne, seront gérer par une troisième carte PC embarqué. Ces 3 cartes communiqueront via Ethernet.

Finalement, une nouvelle loi de commande en régime glissant d'ordre supérieur est en cours de développement afin de remplacer le contrôle en mode glissant classique. Le contrôle en mode glissant d'ordre supérieur gardera les avantages du mode glissant classique tout en diminuant l'effet de réticence.

References

[1] M.Aucher, *Dynamique des sous-marins*, Sciences et techniques de l'armement, 1980.

[2] TI.Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons Ltd, 1994.

[3] R.Cristi, FA.Papoulias and AJ.Healey, "Adaptive Sliding Mode Control of Autonomous Underwater Vehicles in the Dive Plane", *IEEE Journal of Engineering*, vol.15, no. 3, pp. 152-160, 1990.

[4] L.Rodrigues, P.Tavares and M.Prado, "Sliding Mode Control of an AUV in the Diving and Steering Planes", *Proceedings of Oceans 96 MTS/IEEE*, 23-26 Sept., Fort Lauderdale, Florida, USA, 1996.

[5] Sname, Society of Naval Architects and Marine Engineers, "Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid", *Technical and Research Bulletin*, Technical Report No.I-5, 1994.