

Session 8 : Observatoires inhabités du fond de la mer

ETAT DE L'ART DES VEHICULES SOUS-MARINS AUTONOMES, VERROUS TECHNOLOGIQUES

Jean-Louis Michel

Raoul Duranton

IFREMER
Centre de Toulon-La Seyne

SOCIETE ECA
Toulon

Les Véhicules Sous-marins Autonomes, dits aussi "Véhicules Libres", sont des engins auto-propulsés, munis d'une source d'énergie embarquée, qui n'ont aucun lien solide de communication avec la surface.

Depuis leur origine dans le domaine civil, il y a environ 15 ans, on a dénombré environ une trentaine de projets de véhicules autonomes conçus et/ou développés, à des titres divers, dans plusieurs pays. En ce début des années 90, on peut constater un regain d'intérêt de la Communauté de l'Intervention Sous-marine pour les véhicules autonomes, et un certain nombre de nouveaux projets sont annoncés ou lancés.

En France, une expérience concrète s'est bâtie dans ce domaine, partagée entre l'IFREMER et la Société Eca. Le véhicule "Epaulard" en constitue la meilleure représentation.

Le présent exposé a pour but de présenter un état de l'Art actualisé du développement des véhicules autonomes.

Il aborde les points suivants :

- Un bref rappel historique fait le point des systèmes existants et de leur utilisation. L'expérience française permet notamment de situer les apports potentiels et complémentaires des véhicules autonomes dans une panoplie de divers systèmes opérationnels.
- Une présentation succincte des principaux développements annoncés dans le monde permet de juger de l'intérêt de cette technique particulière dans le contexte de la robotique sous-marine.
- Une analyse des aspects opérationnels de ces divers projets permet une répartition des différents concepts en grandes classes de profils de missions.
- Pour chacune de ces classes, on identifie un certain nombre de technologies-clés qui constituent des points de passage impératifs pour des développements futurs.

Session 8 : Unmanned deep sea observatories

STATE OF THE ART ON AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES, KEY TECHNOLOGIES

Jean-Louis Michel

Raoul Duranton

IFREMER
Centre de Toulon-La Seyne

SOCIETE ECA
Toulon

Autonomous Underwater Vehicles, also called "free-swimming vehicles" are self propelled bodies, equipped with their own energy package and with no solid communication link with the surface.

Since their origin in the civilian sector, 15 years ago, about thirty projects have been identified, designed and/or developed for various uses in different countries. At the beginning of the 90-ties, one can notice a renewed interest from the Underwater Intervention Community for autonomous vehicles and quite a number of new projects are announced or being started.

In France, a solid experience has been built in this field, shared between IFREMER and Société Eca. The "Epaulard" vehicle is representative of this experience.

The present paper aims at presenting an updated State of the Art on the development of autonomous vehicles.

It addresses the following points :

- A brief historical review presents some existing systems and uses. The French experience, in particular, allows to position the potential, and complementary contribution of autonomous vehicles, in a range of various operational systems.
- A short review of the main developments announced in the world demonstrates the particular interest for this technique, in the context of underwater robotics.
- An analysis of the operational aspects of these various projects leads to a distribution of the different concepts into main classes of mission profiles.
- For each of these classes, one can identify a number of key-technologies which constitute necessary and critical way points for future developments.

ETAT DE L'ART DES VEHICULES SOUS-MARINS AUTONOMES
VERROUS TECHNOLOGIQUES

Jean-Louis MICHEL
IFREMER
Centre de Toulon-La Seyne

Raoul DURANTON
Société ECA
Toulon

On entend par "Véhicule Libre" un véhicule sous-marin inhabité autonome, c'est à dire autopropulsé, équipé d'une source d'énergie embarquée et ne disposant d'aucun lien de communication physique avec son bateau porteur.

La communauté rovotique retiendra l'acronyme anglais "AUV" ("Autonomous Underwater Vehicle"), alors qu'aux U.S.A. certains les appellent "UUV" ("Unmanned Underwater Vehicle").

Bien entendu, cette définition courte et restreinte ne décrit pas un type unique de véhicule mais ouvre sur une grande variété. Ainsi, sur le plan du pilotage, cette caractéristique entraîne deux configurations possibles :

- Des véhicule dits "robotisés", à navigation préprogrammée,
- Des véhicule "téléopérés" par voie acoustique.

HISTORIQUE

Si l'on excepte la classe particulière des torpilles (qui existent depuis plus d'un siècle), les premiers véhicules libres sont apparus dans les années 60 et 70. Les premiers véhicules développés (par exemple SPURV aux USA, Epaulard en France,...) étaient des cas relativement uniques et peu connus.

A ce jour, on a dénombré environ une trentaine de véhicules libres conçus et, dans certains cas, développés, à des titre divers dans différents pays. Au début des années 90, on constate un regain d'intérêt d'une partie de la communauté de l'intervention sous-marine pour les véhicules libres, et un certain nombre de nouveaux projets sont en démarrage ou annoncés.

En France, les premiers véhicules libres ont été des modèles libres de sous-marins militaires développés par la Société ECA pour l'Armement à partir de 1966. Puis, le développement de l'EPAULARD, entre 1976 et 1980, par l'IFREMER (ex-CNEXO) et la Société ECA, a constitué une première reconnue et permis l'acquisition de connaissances nouvelles dans ce domaine.

L'IFREMER et divers industriels français ont ensuite valorisé ces premières expériences à travers un certain nombre d'études qui sont restées soit au stade conceptuel (Epaulard 2, VEGA : Véhicule à Grande Autonomie) soit au stade d'un pré-développement (ELIT : Engin Libre Inhabité Téléopéré).

En parallèle avec ces études au niveau "Système", l'IFREMER a conduit plusieurs analyses au niveau des technologies de base (sources d'énergie, positionnement, transmissions acoustiques, pilotage, etc...).

COMPLEMENTARITE DES SYSTEMES - L'EXPERIENCE FRANCAISE

Le développement et la mise en service opérationnel de l'EPAULARD n'a pas été une fin en soi, mais a permis à l'IFREMER de bâtir une panoplie de moyens d'intervention très complémentaires, dans les domaines civil et scientifique. Ces différents moyens permettent une exploration des fonds marins par étapes successives de résolution croissante :

(1) Une carte détaillée du fond, à grande échelle, est tout d'abord obtenue par un sondeur multi-faisceaux (Sea-Beam, EM12).

(2) Une exploration à échelle moyenne, par recueil d'images de type "acoustique" est ensuite obtenue par un véhicule transportant un sonar latéral : le SAR.

(3) Un survol du fond à faible altitude et à résolution "optique" par le véhicule libre EPAULARD, qui permet la prise de vue photographique, ou par un véhicule remorqué à faible vitesse, le SCAMPI, qui permet la transmission d'images de télévision en temps réel.

(4) Enfin, l'utilisation d'un sous-marin habité comme CYANA ou NAUTILE, éventuellement associé à un outil spécialisé (Robin ou NADIA), permet d'intervenir en détail sur un site d'intérêt particulier.

Ces méthodes complémentaires ont été utilisées principalement pour des explorations scientifiques à grandes profondeurs sur des pentes, des dorsales, des zones à nodules polymétalliques ou des sources hydrothermales.

Le développement de nouveaux systèmes d'intervention doit prendre en compte ce schéma général d'une exploration et s'y insérer harmonieusement. C'est en particulier le cas pour les véhicules libres. On a vu que l'EPAULARD remplissait de manière optimale la fonction (3) sur des zones limitées, lorsqu'il n'était pas nécessaire de remonter l'information en temps réel. D'une manière générale, ce sont les fonctions (2) et (3) qui présentent le plus grand potentiel d'application pour des véhicules libres inhabités.

PRINCIPAUX DEVELOPPEMENTS ANNONCES - JUSTIFICATIONS

A la fin de l'année 1990, il est difficile de recenser avec précision tous les véhicules annoncés dans le monde. On peut estimer que des travaux sont en cours dans au moins 10 pays différents pour un total d'au minimum 40 projets. En Europe, les pays les plus avancés sont la France et la Grande-Bretagne. Aux Etats-Unis uniquement, 26 projets sont identifiés, dont 18 financés par la DARPA, ce qui démontre un vif intérêt militaire pour le sujet. Vient ensuite la communauté scientifique intéressée notamment par un accès plus efficace aux grandes profondeurs.

Les applications envisagées (militaires et civiles confondues) sont de deux ordres :

- Intérêt d'ordre général pour cette nouvelle technique : étude des possibilités et limitations, vecteurs pour transport et évaluation de nouvelles charges utiles, tests ou mise au point de nouvelles technologies de base : sources d'énergie, propulsion, formes hydrodynamiques optimisées, algorithmes d'intelligence artificielle, nouveaux modes de contrôle ou d'asservissements, analyse d'image, relocalisation.
- Applications précises : dépôt de capteurs sous-marins, espionnage, détection et délimitation de champs de mines, remorquage de systèmes d'écoutes, contre-mesures acoustiques ou électroniques, intervention sous les glaces, recherche d'épaves, assistance à plongeurs, suivi de câbles ou de pipelines, mesures océanographiques, surveys géologiques, biologie, environnement, etc.

Il faut également remarquer qu'à côté de ces projets bâtis autour d'un seul véhicule on peut recenser d'autres concepts tels que, par exemple :

- Projets mettant en oeuvre plusieurs véhicules libres simultanément, soit d'importance égale, soit hiérarchisés sous forme "mère-fille",
- Projets de concepts mixtes : véhicule commençant sa mission avec un câble (ROV) puis continuant seul sans le câble (AUV).
- Certains concepteurs font par ailleurs entrer dans le concept de véhicule libre les engins filoguidés parce qu'ils présentent les mêmes caractéristiques de liberté de manoeuvre et d'énergie emportée. (L'exemple le plus connu est celui du PAP 104).

D'une manière générale, une constante dans la justification des nouveaux concepts de véhicules libres est leur mise en compétition avec les autres techniques plus traditionnelles de l'intervention sous-marine :

- Sous-marins habités : les seuls autorisant une présence in-situ, mais fortement handicapés par les faibles autonomies, les problèmes de sécurité et les coûts associés à la présence de l'homme dans le milieu.
- Véhicules remorqués : restent imbattables pour les surveys à grande échelle dans les petites profondeurs et par temps moyens. Dans les grandes profondeurs, la lourdeur de l'équipement, la lenteur de sa mise en oeuvre et la pauvreté du taux de couverture obtenu laissent une chance importante aux véhicules libres de justifier un rendement supérieur.
- Véhicules téléopérés (ROVs) : sont rapidement handicapés par des capacités d'excursion très réduites et leur usage est souvent réduit à des tâches ponctuelles mais avec des capacités de téléprésence (vision et manipulation) imbattables.

En regard de ces techniques concurrentes, le concept de véhicule libre se justifie pour des tâches se prêtant aisément à une "robotisation" : opérations relativement systématiques, programmables, répétitives, et dans des conditions plutôt extrêmes de grands fonds, grandes distances, grandes vitesses, etc ...

ANALYSE OPERATIONNELLE

Une analyse fine des profils de missions des différents concepts recensés permet de dégager trois grandes classes de configurations de véhicules, (détaillées sur la planche 3), identifiées comme suit :

- Véhicules à mission "linéaire" : ces véhicules sont conçus pour effectuer des trajets de longue distance, qu'ils soient horizontaux comme les véhicules "transocéaniques" ou verticaux comme les "profileurs verticaux". Ils ont pour but d'obtenir une couverture à grande échelle, mais sans grande précision.
- Véhicules à mission "surfacique" : ces véhicules, à navigation horizontale, doivent balayer finement une superficie délimitée avec une haute précision qui doit permettre d'obtenir une couverture quasi totale du fond marin. C'est par exemple le cas de véhicules effectuant des recherches au sonar latéral ou en vision optique.
- Véhicules à mission "ponctuelle" : ces véhicules doivent rester pratiquement stationnaire sur un site donné et ont donc des capacités d'excursion très faibles. Ce sont par exemple des véhicules d'observation ou de mesure sur sites précis.

Ces trois classes de véhicules présentent des caractéristiques de profil de missions très complémentaires similaires à ceux des systèmes de la panoplie IFREMER décrits plus haut et autorisent la même approche. Par exemple, une campagne d'investigation d'un champ de nodules nécessite des phases d'exploration d'échelles décroissantes et de résolution croissante.

Si l'on analyse une utilisation possible de ces véhicules à des fins scientifiques, on peut distinguer les types de missions suivantes :

- Le véhicule linéaire permet une modélisation globale du milieu, sur de grandes distances mais avec une résolution spatiale faible : par exemple profils transversaux à travers un océan, avec mise en oeuvre de capteurs type CTD.
- Le véhicule surfacique permet l'analyse de détails moyens sur des zones d'intérêt particulier, de surface limitée, avec une résolution dite "acoustique" (sonar latéral par exemple). La zone de travail peut, par exemple, avoir été déterminée par une campagne de type "linéaire".
- Le véhicule ponctuel permet l'analyse de détails très fins, avec une résolution "optique" (photo ou télévision). Le site à investiguer peut avoir été déterminé, par exemple, par une campagne de type "surfacique".

Pour un profil de mission donné, des études paramétriques permettent d'estimer l'influence des principaux composants sur la configuration du système et ses performances.

De telles études, réalisées principalement pour des systèmes à grande autonomie ont mis en évidence l'importance des fonctions source d'énergie et caissons étanches, ainsi que des paramètres liés au véhicule tels que caractéristiques hydrodynamiques, consommation d'énergie, masses et volumes.

Elles ont par exemple montré que le choix de la vitesse du véhicule peut conduire à une autonomie non optimisée, ou qu'en fait, une répartition judicieuse de la puissance entre équipements et propulsion permet d'établir une vitesse économique, si le temps de mission n'est pas limitatif (cas de tâches supplémentaires réalisées par le bateau pendant une plongée).

Ces analyses sous forme paramétrique contribuent ainsi à identifier des paramètres technologiques critiques pour un éventuel développement, comme l'ont montré les expériences Epaulard ou ELIT.

LES TECHNOLOGIES-CLÉS

Pour chacune des classes de véhicules libres répertoriées plus haut, on peut identifier un certain nombre de technologies-clés qui sont des points de passage critiques d'un éventuel développement. Elles interviennent avec une importance variable dans chaque classe.

Pilotage

Le pilotage intègre les fonctions nécessaires à la conduite d'un véhicule le long de trajectoires définies par la planification de mission. Par exemple avec un sonar latéral, l'engin devra décrire plusieurs rails parallèles entre eux, à une distance de l'ordre de la portée totale du sonar. Dans le cas où la couverture doit être complète, les exigences sur la précision de pilotage seront accrues. Les fonctions qui contribuent au pilotage sont le positionnement, la navigation et le contrôle d'attitude.

Positionnement

Les problèmes rencontrés sont plus importants pour les véhicules de type surfaciques car leur précision de navigation doit permettre d'obtenir des taux de couverture élevés.

Pour l'échelle des zones envisagées, les moyens de positionnement sous-marins les plus utilisés sont la base longue, et la base courte. Ils sont généralement associés à des moyens de radio-localisation de surface lorsqu'un positionnement absolu est souhaité.

Cette fonction étant un point critique conditionnant le niveau d'autonomie du véhicule, l'accent est mis sur des systèmes permettant de limiter l'intervention du bâtiment support.

Dans le cas des engins linéaires, il n'est pas possible d'utiliser des techniques acoustiques de positionnement actif. Une navigation à l'estime (cap et vitesse) est alors envisageable, si la précision requise n'est pas élevée. Cependant cette précision est affectée par la dérive des capteurs, les courants marins non connus et la durée des missions. Il peut s'avérer alors nécessaire d'hybrider cette technique avec un recalage radioélectrique de type GPS, ce qui impose au véhicule des retours en surface périodiques.

Un autre problème se pose pour le véhicule à mission de type linéaire et à grand rayon d'action, s'il n'est pas suivi par son bâtiment porteur : il doit être relocalisé avec une grande précision à un point de "rendez-vous".

Navigation

La navigation comprend généralement une fonction de suivi de route horizontale et une fonction de suivi de fond vertical.

Le suivi de route se fait par combinaison des informations de positionnement externes et des données de cap et de vitesse du véhicule, fournies par des capteurs standards ou inertiels.

Différents scénarii sont envisageables suivant les contraintes de coûts d'opération, de précision, de taux de couverture, d'environnement, etc.... Les tâches peuvent être réparties en différents niveaux entre la surface et le fond si une liaison acoustique existe, ce qui est toutefois en opposition avec la recherche d'autonomie du véhicule par rapport au support.

Le survol des fonds pose des problèmes particuliers lorsqu'un relief est rencontré : le vecteur doit pouvoir en suivre la pente moyenne et franchir des obstacles de grandes dimensions. L'altitude et la vitesse de survol du fond sont imposées par la nature du capteur utilisé (portées optiques ou acoustiques) et les caractéristiques dynamiques du véhicule.

Stabilité du vecteur

Certains senseurs embarqués comme le sonar latéral peuvent imposer des contraintes élevées de tenue d'attitude statique et dynamique du véhicule dans toute sa plage de fonctionnement : vitesses, girations, capacités d'évolution, etc...

Tenue du point fixe

Cette technique est à mettre en oeuvre pour un véhicule de type ponctuel. Il doit être stabilisé au point fixe alors que les transmissions acoustiques imposent des cadences d'information trop faibles et des retards incompatibles avec une commande directe de la propulsion.

Le maintien en station est établi automatiquement en fonction d'informations d'attitude du véhicule (accélérations et vitesses relatives), et d'informations de positionnement. Des techniques d'écartométrie automatique sur écrans vidéos permettent, à partir de l'image télévisée d'une scène, d'immobiliser le véhicule devant une cible désignée. Des mesures acoustiques ou optiques sont également envisageables.

Sources d'énergie

Pour les véhicules à rayon d'action supérieur à plusieurs centaines de kilomètres, la source d'énergie devient la partie dimensionnante du système.

Des études paramétriques ont montré que, pour des rayons d'action supérieurs à 500 kilomètres, des énergies supérieures à 500 kilowatt-heures étaient nécessaires. Les masses et dimensions de véhicules obtenues avec des sources d'énergie de type batterie, même de technologie avancée, peuvent devenir prohibitives.

Les sources électrochimiques de type pile à combustible, envisageables à long terme, nécessitent de gros budgets de R&D avec une faisabilité difficile à prédire. Des sources thermiques sont possibles, conduisant à des masses de véhicules comparables entre elles.

CONCLUSION

Les véhicules libres offrent l'avantage d'être moins coûteux que les systèmes habités. Par rapport aux systèmes remorqués, le fait qu'ils n'ont pas de liens physiques avec le bâtiment support permet l'emploi de bâtiments banalisés non équipés de systèmes de navigation ou de tenue de point fixe évolués.

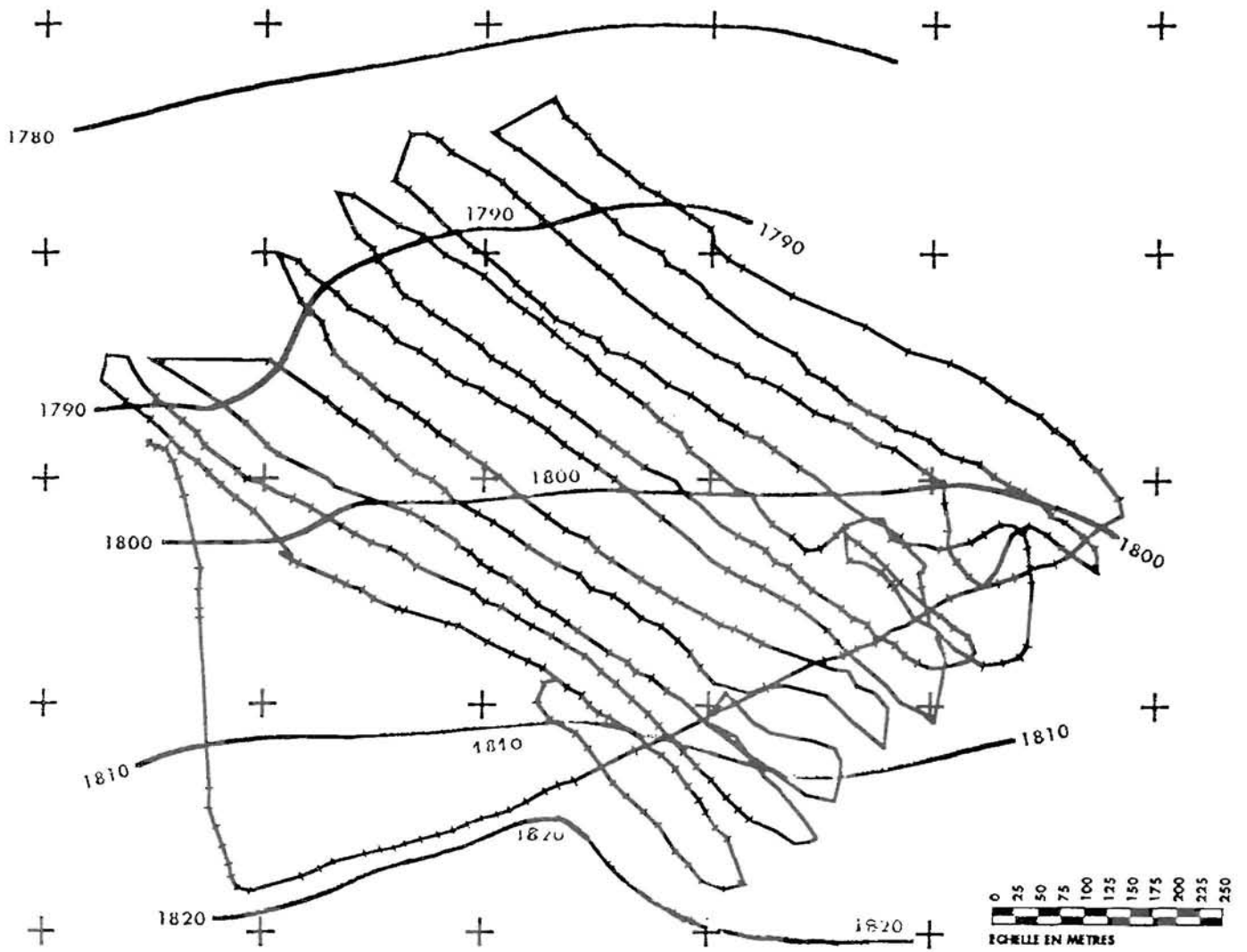
Ces véhicules permettent une grande précision de navigation et offrent une plateforme stable pour l'emport de différents senseurs. Leur principale contrainte est leur autonomie, en termes d'énergie et de navigation.

A condition de les doter d'un haut niveau d'autonomie, ils permettent de libérer le bâtiment porteur pour d'autres tâches ce qui peut augmenter considérablement leur intérêt opérationnel.

Des véhicules libres téléopérés aux robots totalement autonomes, différentes étapes sont à franchir par les concepteurs en relation étroite avec les utilisateurs potentiels, leurs intérêts spécifiques, les avancées technologiques, et les potentialités complémentaires des autres systèmes d'intervention.

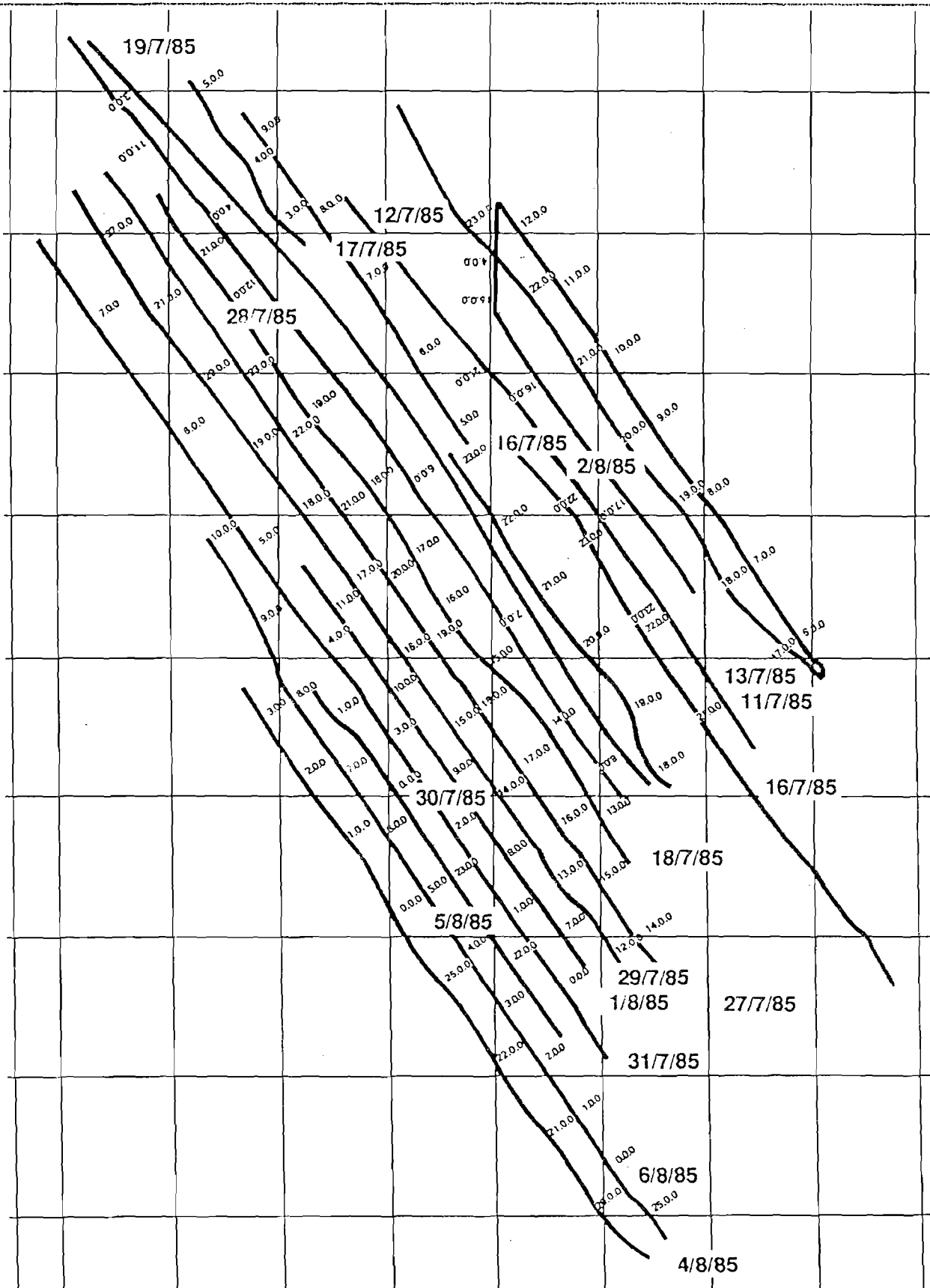
ANNEXE 1

EPAULARD PROFILES ON A WRECK AREA



ANNEXE 2

SAR PROFILES ON DEEP SLOPES
(4000 m)



ANNEXE 3 : CLASSES DE VEHICULES LIBRES

	1	2	3
<i>CLASSES :</i>	Surfacique	Linéaire	Ponctuel
<i>Missions :</i>	Imagerie-bathymétrie Recherche objets sur le fond	Collecte données Profils verticaux	Observation
<i>Echelle :</i>	Moyenne	Grande	Locale
<i>Autonomie :</i>	100 - 200 km	1000 - 5000 km	5 km
<i>Zone balayée :</i>	20 x 20 km	Linéaire	200x200 m
<i>Couverture :</i>	100 %	/	/
<i>Immersions :</i>	6000 m	1000 - 6000 m	1000 m
<i>Vitesse :</i>	2 - 5 nd	10 - 20 nd	1 - 2 nd
<i>Cycles :</i>	1 cycle / jour	1 mission	4 - 6 h
<i>Navigation :</i>	Horizontale : altitude constante	Ondulant (0 à 6000 m)	Horizontale (au sonar et à vue)
<i>Précision :</i>	5 - 50 m (svt couverture)	2 km	Absolue : 10m (verticale navire) Relative : 0.5 m
<i>Positionnement :</i>	1 ou qq balises (Base courte)	GPS	Absolu : BC Relatif : sonar +
<i>Capteurs et techniques de navigation :</i>	Compas + doppler + ... Filtrage/Hybrid.		Sondeurs + Ecartomètre TV (opérateur)
<i>Senseurs :</i>	Sonar latéral + bathymétrie Sondeur pénétrateur	Capteurs CTD Préleveur eau	Caméras TV NB Caméra photo
<i>Masse :</i>	2 - 3 t	5 - 10 t	0,5 - 1 t
<i>Plateforme de mise en oeuvre :</i>	Navire Océano.	Navire Océano. Base terrestre	Supply ship
<i>PROJETS IFREMER :</i>	EPAULARD	VEGA	ELIT
<i>Statut de développement :</i>	(opérationnel)	(analyse paramétrique)	Pré-développement