

Annales Hydrographiques



6^e série - Vol. 7
n° 776



2010



776 - ZTL

ANNALES HYDROGRAPHIQUES

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
Première partie	
Éditorial : L'océanographie acoustique au SHOM, par l'ICT Y. STÉPHAN.....	1-1
Surveillance, Étude et Reconnaissance de l'ENVironnement par Acoustique Discrète : le séminaire SERENADE par l'ICT Y. STÉPHAN, C. GERVAISE et C. LIRET.....	2-1
La tomographie acoustique océanique : technique du passé ou de l'avenir ? par l'ICT Y. STÉPHAN, J-P. HERMAND et C. GERVAISE.....	3-1
Assimilation de données acoustiques : suivi du front d'Ouessant par O. CARRIÈRE, J-P. HERMAND et l'ICT Y. STÉPHAN.....	4-1
Étude acoustique du bruit de mer par X. DEMOULIN	5-1
Monitoring acoustique passif des campagnes d'océanographie acoustique en présence de mammifères marins : exemple de la campagne ERATO-09 par C. GERVAISE, L. DI IORIO, B. KINDA l'ICT Y. STÉPHAN et N. JOSSO	6-1
Détection des clics de baleines à bec par O. GÉRARD, C. CARTEL et S. CORALUPPI	7-1
Sono-Proxy : un capteur non intrusif du comportement de la coquille Saint-Jacques par B. KINDA, C. GERVAISE, L. CHAUVAUD, V. JAUD, S. BUSSON et T. ROBSON	8-1
Observation de la posidonie par acoustique par J-P. HERMAND.....	9-1
Deuxième partie	
Mission océanographique du Pacifique - (janvier 2000 - juillet 2001), par l'ICA M. EVEN.....	10-1
Mission hydrographique de l'Atlantique - (août 2002 - juillet 2005), par l'ICETA H. DOLOU	11-1
Travaux hydrographiques aux îles Kerguelen - (1996 - 2003), par le MP P. BOURZEIX, l'ICETA H. DOLOU et le MJR H. THOMAS	12-1
Groupe océanographique du Pacifique - (août 2006 - août 2008), par l'IPA D. CRÉACH.....	13-1

Toute correspondance relative à cette publication, et notamment à l'insertion d'articles, doit être adressée au Service hydrographique et océanographique de la marine, CS 92803 - 29228 BREST CEDEX 2.

Les idées exprimées dans les articles sont celles des auteurs et ne représentent pas nécessairement le point de vue du Service hydrographique et océanographique de la marine.

www.shom.fr

© SHOM 2010 — Tous droits réservés.
ISBN 978-2-11-097273-6

PREMIÈRE PARTIE



ÉDITORIAL : L'OCÉANOGRAPHIE ACOUSTIQUE AU SHOM

par Yann Stéphan (1)

RÉSUMÉ

Cet article fait le point sur les activités conduites au SHOM en océanographie acoustique. Cette thématique regroupe les études des effets du milieu sur les systèmes acoustiques utilisés par les forces navales et les méthodes de caractérisation tomographique du milieu. Les principaux axes de recherche et développement dans ces domaines sont présentés.

ABSTRACT

This paper focus on the activities conducted at SHOM in ocean acoustics. These studies are mainly relative to the impact of the environment on the acoustic systems operated by naval forces as well the tomographic characterization of the environment. The major axes of research in this domain are presented and discussed.

(1) Ingénieur cadre technico-commercial chargé d'études et recherches en tomographie acoustique
SHOM, 13, rue du Chatellier, CS92803, 29228 Brest Cedex 2, France.
(Email : yann.stephan@shom.fr)

1. INTRODUCTION

Les activités du Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM) sont bien connues des lecteurs des *Annales Hydrographiques*, fussent-ils habitués ou occasionnels. Si la notoriété du service en matière d'hydrographie et d'océanographie n'est plus à faire, les activités du service relatives à l'acoustique sous-marine, sont probablement moins connues.

On pourra invoquer deux raisons à cela.

La première raison peut être qualifiée de culturelle : l'acoustique sous-marine ne constitue pas le cœur de métier du SHOM, il n'est donc pas surprenant que la communication relative à cette discipline ait été plus "discrète" que celle concernant d'autres activités. Pour autant, l'acoustique sous-marine est un outil indispensable à l'exercice des missions d'un service hydrographique comme le SHOM. En effet, la maîtrise des systèmes acoustiques les plus modernes de mesures de la bathymétrie, des courants, de la nature des fonds marins ou encore de l'épaisseur des couches sédimentaires est une condition sine qua non à la qualité des acquisitions de connaissances hydro-océanographiques nécessaires à la réalisation des produits et services du SHOM destinés aux usagers civils et militaires du milieu marin. Le SHOM a d'ailleurs été pionnier dans ce domaine, s'intéressant très tôt à l'exploitation de la propagation du son sur le repérage acoustique en mer [Lacombe, 1946, Grousseau R., 1955]. Le SHOM, pourrait presque s'enorgueillir de l'invention du sondeur bathymétrique, dont le principe fut énoncé dès 1836 par Urbain Dorcet de Tessan, ingénieur hydrographe¹ !

La seconde raison est opérationnelle. La connaissance et la compréhension des mécanismes de propagation, de réverbération ou de génération du bruit ambiant font partie intégrante de la mission du SHOM de soutenir les opérations navales, principalement pour permettre aux opérationnels de mieux appréhender les effets du milieu sur l'utilisation de leurs systèmes de détection sous-marine. On comprendra que beaucoup de résultats de ces études soient restés dans un cercle d'initiés et d'utilisateurs restreints. Pour autant, l'acquisition d'un savoir-faire en matière d'acoustique sous-marine pour mieux comprendre les effets du milieu sur les opérations navales est un processus entamé depuis plusieurs dizaines d'années, processus rendu particulièrement nécessaire d'une part par les développements technologiques et évolutions tactiques liés à la mise en service opérationnelle de sonars à très basses fréquences, plus sensibles à l'environnement et opérant sur des portées plus longues, et d'autre part par l'accroissement des opérations navales en zones côtières, plus complexes à appréhender.

Ce savoir faire est le fruit d'un nombre conséquent d'études et de recherches à la fois sur l'impact acoustique des phénomènes océanographiques et sur l'optimisation de la description du milieu marin pour les besoins de la détection sous-marine, activités regroupées sous le terme générique "d'océanographie acoustique" pour les besoins de cet article.

En définitive, on ne relève dans les *Annales Hydrographiques* que peu de références concernant l'acoustique sous-marine en général et l'océanographie acoustique en particulier. La publication d'un numéro spécial consacré au séminaire SERENADE [Stéphan *et al.*, 2010], apporte l'occasion de combler, bien que très partiellement, cette "lacune". Ce numéro spécial fournit ainsi l'opportunité de présenter, en complément d'un article publié dans les précédentes *Annales Hydrographiques* n° 775 [Morel, 2010], quelques résultats récents d'études et recherches en océanographie acoustique conduites au SHOM et chez ses partenaires. Il présente aussi quelques axes de recherche dans le domaine de la caractérisation acoustique du milieu marin et de l'impact acoustique de l'environnement.

La première partie de cet article revient brièvement sur les évolutions récentes des activités en océanographie acoustique. La seconde partie présente les principales thématiques de recherche en cours au SHOM. Enfin, conclusions et perspectives sont dressées en fin d'article.

2. UN BREF HISTORIQUE...

L'origine : environnement et sonars

La connaissance de l'environnement est un facteur essentiel pour évaluer les performances des sonars. Dans le cadre de sa mission de Défense, en particulier de soutien aux opérations navales, une des premières actions du SHOM a été de fournir aux forces des conditions typiques, au sens statistique du terme, des environnements de propagation. Ce sont les albums de champs sonores, édités par le SHOM à usage des unités de la marine, et dont certains comportaient une estimation des pertes de propagation acoustique (figure 1) permettant d'estimer les portées de détection en l'absence de systèmes embarqués de mesure de la bathycélérimétrie. L'avènement des systèmes de mesures et de calculs embarqués, tels que les sondes perdables et les outils numériques de modélisation de la propagation, a rendu obsolète ces albums de champs sonores pour une utilisation temps réel. Néanmoins, la connaissance statistique d'un théâtre d'opération, en incluant l'ordre de grandeur des caractéristiques de la propagation acoustique, reste un outil important pour la planification des opérations.

¹ « J'ai proposé, en 1836, dans des notes placées à la suite des Instructions nautiques sur les côtes de l'Algérie, de M. A. Bérard, un moyen de mesurer les grandes profondeurs de la mer, basé sur l'emploi de bombes qui feraient explosion en touchant le fond. (Le bruit de l'explosion ferait connaître l'instant de l'arrivée, et la durée de la chute ferait connaître la profondeur, puisque la vitesse de la chute est constante.) Quelques personnes ont douté que le bruit de l'explosion d'une bombe arrivée au fond de la mer (4 lieues) pût être entendue de la surface. ... on sait que l'eau, étant beaucoup plus dense et plus homogène que l'air doit transmettre le son beaucoup mieux que lui. Au reste, l'observation directe, faite par M. Colladon sur le lac de Genève, est plus probante encore ; ... Il me semble, d'après cela, qu'on ne peut plus élever de doutes raisonnables sur la possibilité d'entendre, de la surface, le bruit de l'explosion d'une bombe suffisamment chargée, qui éclaterait au fond de la mer. » (*Physique, tome IV, 1844, 226*)

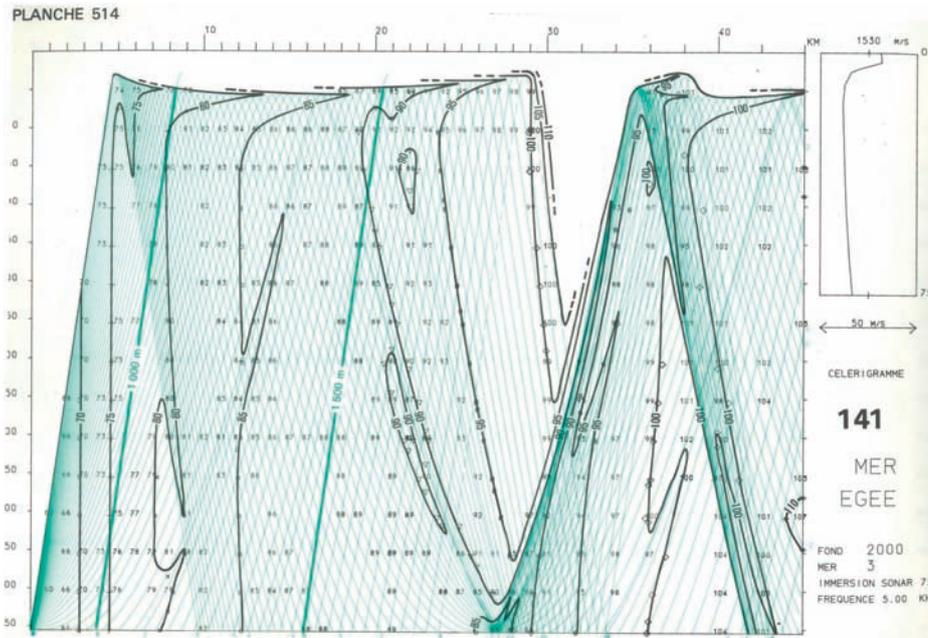


Figure 1 : Exemple de champ sonore en mer Égée tirée de l'album de champ sonore "Méditerranée orientale", n° 722, 1982.

Le premier élan : la tomographie acoustique

Le véritable essor de l'océanographie acoustique au SHOM, dans son contour défini en introduction, eu lieu à la moitié des années 80 grâce à l'implication du service dans l'importation en France des techniques de tomographie acoustique (Munk et Wunsch, 1979), en partenariat avec la Direction générale de l'armement (DGA) et l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer). La tomographie acoustique, qui est discutée plus en détail dans un autre article de ce volume [Stéphan *et al.*, 2010], présente en effet un double intérêt. Il s'agit d'une part d'une méthode de mesure des paramètres physiques de l'océan à l'échelle des théâtres d'opérations et son emploi contribue donc à la

connaissance océano-acoustique de ceux-ci. Il s'agit d'autre part d'un système de mesure in situ de l'impact des phénomènes océanographiques et donc un excellent outil pour la compréhension des effets positifs ou négatifs sur l'emploi tactique des sonars. Le SHOM, soutenu par la DGA et la marine, a mené dès 1987 une expérience pilote sur le bord est de l'océan Atlantique (campagne BORD-EST, en collaboration avec l'Ifremer) puis une expérience majeure de validation de la technique en 1990, la campagne GASTOM² (figure 2), qui a confirmé tout le potentiel de la tomographie pour améliorer la perception du milieu et de son impact [Stéphan, 1998].

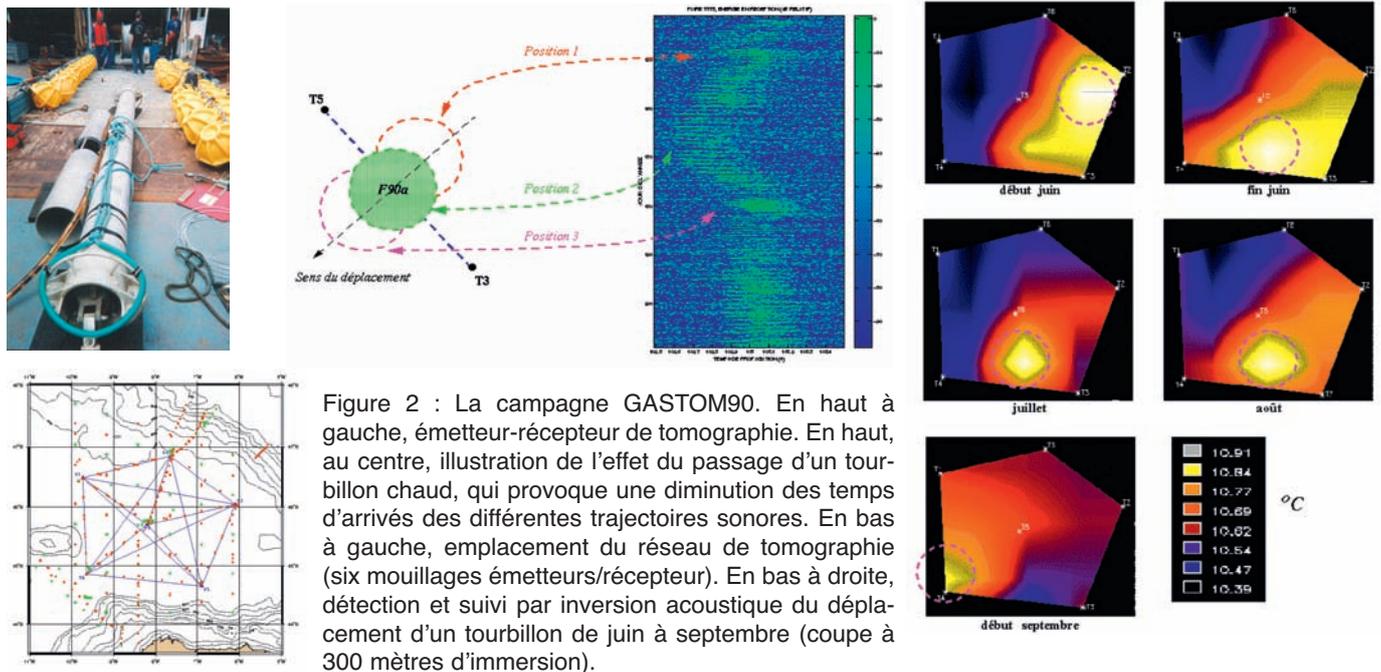


Figure 2 : La campagne GASTOM90. En haut à gauche, émetteur-récepteur de tomographie. En haut, au centre, illustration de l'effet du passage d'un tourbillon chaud, qui provoque une diminution des temps d'arrivées des différentes trajectoires sonores. En bas à gauche, emplacement du réseau de tomographie (six mouillages émetteurs/récepteur). En bas à droite, détection et suivi par inversion acoustique du déplacement d'un tourbillon de juin à septembre (coupe à 300 mètres d'immersion).

² GAScogne TOMographie

La confirmation : de la tomographie de bassin à la reconnaissance océano-acoustique de théâtres côtiers

Si la première application opérationnelle envisagée pour la tomographie portait sur l'élaboration d'observatoires acoustiques sur les plaines abyssales, l'évolution du contexte géostratégique international vers le milieu des années 90 a étendu les zones de crises potentielles, donc de menaces sous-marines, des zones hauturières vers les environnements côtiers. Les résultats prometteurs de la tomographie par grands fonds ont suscité le portage du concept d'observation acoustique du milieu et de son impact par petits fonds, concept qu'on retrouve généralement sous la dénomination d'évaluation rapide de l'environnement acoustique (REA acoustique³) : comment, à partir de mesures de propagation acoustique sur des systèmes éparses et rapidement déployables, peut-on caractériser la variabilité océanique et géoacoustique d'une zone *a priori* mal connue ? La réponse à cette problématique est toujours aujourd'hui un axe majeur des activités en océanographie du service, qui assure notamment pour le compte de la DGA la maîtrise d'ouvrage de programmes d'études amont dans ce domaine. Dès

1996, les excellents résultats de la campagne INTIMATE⁴, une des toutes premières campagnes de tomographie par petits fonds au monde, ont confirmé la faisabilité technique et l'intérêt opérationnel de la technique (Stéphan *et al.*, 2000). Dans les années 2000, le lancement et la réalisation du programme d'étude amont STEREO se sont traduits en 2008 par la validation d'un démonstrateur de REA acoustique, le système STEREO⁵. Ce système, composé d'une source acoustique très basse fréquence et de quatre bouées dérivantes, permet, en précurseur au déploiement d'unités opérationnelles sur un théâtre côtier, de mesurer les caractéristiques océano-acoustiques d'une zone d'opération afin de valider ou d'infirmer la pertinence de la connaissance environnementale de cette zone pour la détection sous-marine (figure 3). Si, en l'état des connaissances, les prédictions acoustiques sont conformes aux mesures du système, la situation environnementale est considérée comme valide. Si ce n'est pas le cas, le système STEREO permet, par inversion de données, de modifier la perception de l'environnement pour la rendre conforme aux caractéristiques acoustiques observées.

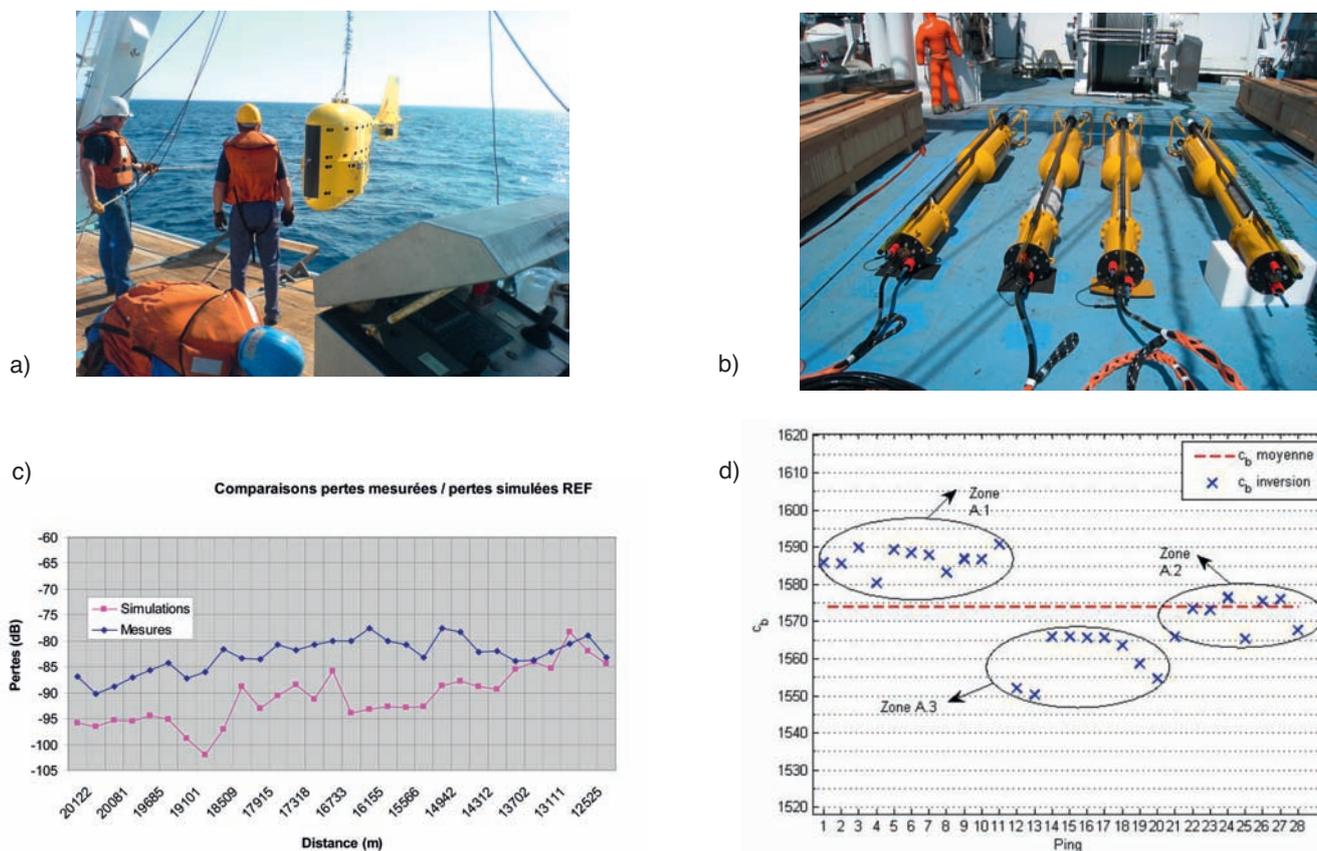


Figure 3 : Système STEREO ; en haut à gauche, sous-système "ensemble remorqué" mis à l'eau depuis le BHO *Beautemps-Beaupré* ; en haut à droite, le sous-système "bouées" composé de 4 unités (mats repliés) et leurs antennes associées ; en bas à gauche, exemple de comparaison entre pertes de propagation prédite et pertes de propagation mesurées par le système en fonction de la distance source - récepteur. En bas à droite, résultats d'inversion permettant d'estimer à partir des mesures la vitesse de compression du fond et sa variabilité.

³ Rapid Environmental Assessment

⁴ Internal Tide Investigation by Means of Acoustic Tomography Experiment (observation de la marée interne par la tomographie acoustique)

⁵ STEREO est l'acronyme de Système Temps réel d'Evaluation Rapide de l'Environnement Océano-acoustique

Comme évoqué auparavant, le SHOM a développé une compétence en acoustique sous-marine essentiellement axée vers les applications liées à l'observation du milieu par techniques tomographiques et à l'impact de l'environnement sur les sonars afin de mieux répondre au besoin de la marine en matière de prévision et d'exploitation des performances de sonars de détection sous-marine. Cette compétence évolue et s'étoffe en fonction des besoins opérationnels. Ainsi, le SHOM s'est vu confier la gestion opérationnelle des bases de données de bruit ambiant à des fins de production et de prévision opérationnelle de cette grandeur pour les forces sous-marines. Les activités du SHOM en océanographie acoustique à l'heure actuelle peuvent être décrites en cinq principaux volets :

- la constitution de bases de données acoustiques : le SHOM enrichit et gère des bases exploitées ensuite pour des activités opérationnelles ou d'étude ;
- le soutien opérationnel : le SHOM diffuse à la marine des produits relatifs à la connaissance des caractéristiques acoustiques du milieu marin (propagation, réverbération, bruit ambiant). Ces produits peuvent être à caractère permanents ou éphémères (prévisions de bruit ambiant, par exemple) ;
- l'expertise et les études : le SHOM réalise des expertises et conduit ou pilote des études dans le domaine de l'observation acoustique du milieu et les effets de l'environnement sur la propagation acoustique et le bruit ambiant (figure 4) ;
- les campagnes à la mer : le SHOM acquiert des données en mer à partir de la flotte hydro-océanographique mise à sa disposition. Il spécifie et réalise régulièrement des expérimentations acoustiques, en particulier dans le cadre des programmes d'études amont que lui confie la DGA ;
- l'instrumentation acoustique : le SHOM dispose d'un parc instrumental en acoustique sous-marine dans le domaine des très basses fréquences (sources acoustiques et bouées réceptrices).

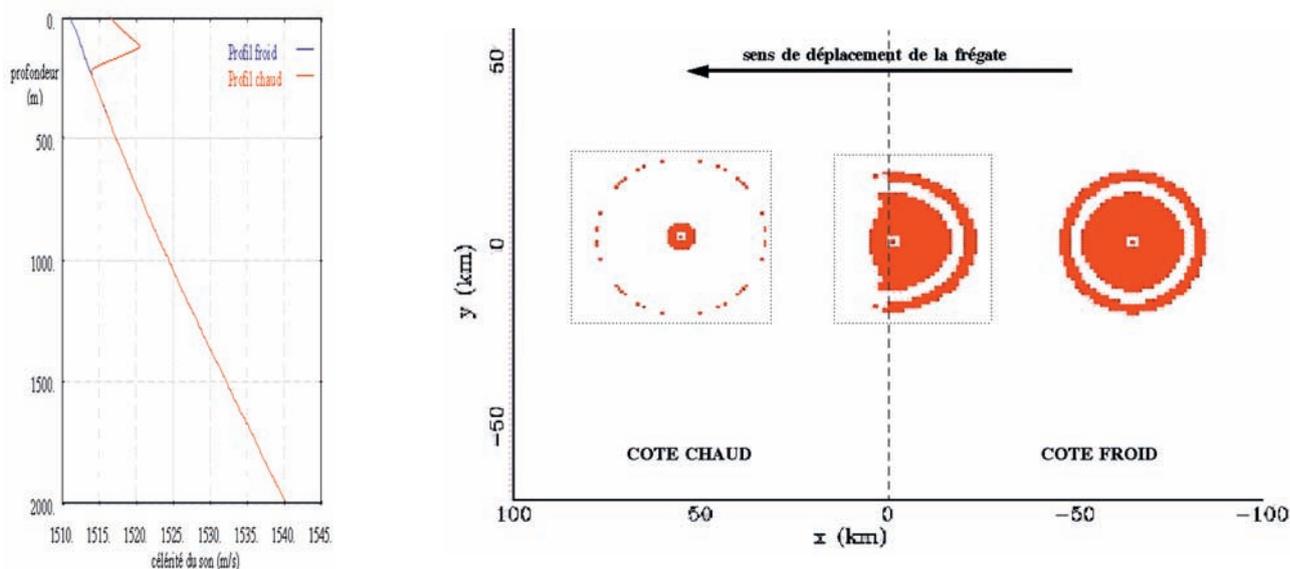


Figure 4 : Exemple d'étude d'impact montrant l'influence d'un front thermique sur le disque de détection d'un sonar de coque.

⁶ Évaluation Rapide de l'environnement Acoustique par Tomographie Océanique.

3. LES PRINCIPAUX AXES DE RECHERCHE EN OCÉANOGRAPHIE ACOUSTIQUE

La recherche au SHOM en matière d'océanographie acoustique vise principalement à répondre à la problématique de REA acoustique. A ce titre, elle est essentiellement soutenue par les programmes d'études amont STEREO et ERATO⁶, dont le SHOM assure la maîtrise d'ouvrage par délégation de la DGA.

3.1 Le REA acoustique

Malgré les progrès importants réalisés depuis une décennie en matière de description de l'environnement, un modèle de description physique du milieu est par construction une approximation de la réalité physique. Comme tout modèle, il peut être imprécis, incomplet ou partiellement erroné. Ce constat pose la question de connaître l'impact de cette méconnaissance sur l'exploitation des systèmes sonars sachant que la physique de la propagation est telle que sur certains paramètres, une petite erreur de modèle peut générer des écarts importants entre les performances prévues et les performances observées alors que sur certains autres paramètres, une grosse erreur de modèle peut ne générer que des écarts faibles entre les performances prévues et les performances observées. C'est de cette idée de mesurer l'impact de la méconnaissance de l'environnement qu'est né le concept de REA acoustique.

Ce concept repose sur la mesure *in situ* des performances acoustiques d'un système dont les caractéristiques intrinsèques sont proches des sonars opérationnels. En déployant le système en précurseur à des échéances proches des opérations, on peut mesurer les paramètres acoustiques qui contribuent aux performances des sonars (pertes de propagation, bruit ambiant et réverbération) afin de vérifier que le modèle d'environnement est pertinent. Si ce n'est pas le cas, c'est-à-dire si les mesures acoustiques ne sont pas conformes aux prévisions de performances

issues du modèle d'environnement, le système de REA acoustique peut permettre de modifier le modèle initial en minimisant l'écart entre les performances réelles et les performances prévues. Deux approches sont possibles :

- soit on affecte au modèle des paramètres équivalents, quitte à s'éloigner de la réalité physique ; ces paramètres équivalents sont par construction des paramètres d'environnement obtenus par inversion des données mesurées c'est-à-dire que ces paramètres sont équivalents aux paramètres d'environnement du point de vue de leur comportement acoustique ;
- soit on améliore le modèle initial en assimilant et/ou fusionnant les données du système acoustique de REA.

3.2 Voies de recherches et développements

Le but est de concevoir et réaliser un système de déploiement léger capable d'évaluer de manière discrète et exhaustive une zone de plusieurs dizaines de nautiques de coté. Une première étape a été franchie grâce au démonstrateur STEREO, qui a montré la faisabilité technique du concept. Il reste à présent à lever certains verrous.

Un premier verrou concerne la discrétion d'un tel système. Dans le cadre d'opérations militaires, le fait d'émettre des signaux, qui pouvant s'entendre à plusieurs dizaines de nautiques, sont susceptibles d'une part de dévoiler ses intentions et d'autre part de perturber d'éventuelles opérations en cours, est un frein à une éventuelle exploitation opérationnelle du concept de REA acoustique. Les techniques actuelles, qui reposent principalement sur des émissions contrôlées en niveau et en caractéristiques spectrales, devront être adaptées à l'exploitation de signaux non optimaux et de faible rapport signal sur bruit. C'est l'objet de ce qu'on désigne par tomographie discrète (Gervaise *et al.*, 2007) et qui constitue un axe majeur de recherche pour les années à venir.

Un deuxième verrou est que l'utilisation de système de mesures à bande limitée (de 900 à 2 200 hertz dans le cas de STEREO) ne permet de caractériser le milieu que par son impact acoustique dans cette bande. C'est le principe du milieu équivalent. Par exemple, une couche sédimentaire trop profonde pour être perçue à ces fréquences, ne sera pas détectée par le système STEREO mais pourrait avoir un impact fort pour des sonars travaillant plus bas en fréquence. Cette restriction peut se lever de deux façons par :

- l'étalement de la gamme de fréquence en adjoignant au système de REA acoustique des capteurs supplémentaires fonctionnant à d'autres fréquences ; on parlera de REA acoustique multicapteurs ;
- l'inclusion des mesures en bande limitée au sein d'un système de modélisation complet de l'environnement c'est-à-dire en assimilant la donnée acoustique dans un modèle d'environnement évolutif. On parlera de système global de prévision acoustique.

La définition de nouveaux concepts et méthodes pour lever les verrous exposés précédemment font l'objet de trois projets de recherche, qui vont être abordés dans la suite en les illustrant par quelques résultats.

3.3 Projets en cours

3.3.1 Le projet MODE

Si les systèmes de REA acoustique actifs peuvent être des outils efficaces et relativement aisés à mettre en oeuvre pour l'apprentissage océano-acoustique d'un théâtre, ils reposent sur l'émission dans le milieu naturel de signaux sonores à forte puissance. Le fait de travailler en actif pose trois problèmes :

- l'indiscrétion opérationnelle ; dans un contexte de crise, l'émission d'ondes acoustiques, permettant de renseigner sur le type des activités menées voire interférant avec des opérations sous-marines en cours, est un problème majeur ;
- le coût et la lourdeur de déploiement ; si la technologie des récepteurs acoustiques légers permet d'envisager des matériels de faible encombrement, les sources acoustiques très basses fréquences sont volumineuses et lourdes dès lors que l'on cherche à émettre des fortes puissances. En plus de coût à l'achat, elles nécessitent un bateau porteur, au déploiement coûteux ;
- la pollution sonore ; depuis plusieurs années, la communauté internationale met progressivement en place des mesures de réduction du bruit anthropique, réputé gênant et dans certains cas mortel pour la faune sous-marine. L'utilisation de techniques actives pourra à l'avenir être contrainte et il est de toute façon éco-responsable de minimiser leur emploi.

L'idée de lancer un programme de recherche conséquent sur la tomographie discrète est apparue dès la fin des années 90. L'idée de base, objet de travaux préliminaires au SHOM et à l'ENSIETA, était notamment d'utiliser les techniques temps - fréquences pour estimer en aveugle (i.e. sans maîtrise des émissions) la réponse impulsionnelle du milieu. Ces idées ont été finalisées au sein du projet STEREO sous la forme d'un partenariat entre le SHOM et l'ENSIETA et le concours de TELECOM Bretagne et du GIPSA-Lab. Ce projet, baptisé MODE (Méthodes d'Observation Discrète de l'Environnement), porte sur l'ensemble des concepts de tomographie passive et discrète.

3.3.1.1 Tomographie active discrète

La tomographie active discrète garde la possibilité d'utiliser une source acoustique maîtrisée. Pour assurer la discrétion, la source doit permettre d'émettre soit des signaux pouvant leurrer un observateur adverse (par exemple en réémettant une copie de vocalises entendues sur zone), soit d'émettre des signaux "inaudibles" (signaux codés émis à faible niveau). Les travaux réalisés dans MODE ont permis de démontrer la faisabilité de ces approches par la mise au point et le test de techniques de synthèse numérique de signaux naturellement présents dans le milieu (Cros *et al.*, 2005) ou l'utilisation de signaux codés sous le niveau de bruit ambiant (Rabaste et Chonavel, 2007). Dans les deux cas, le problème se ramène à un problème de tomographie active dont l'approche inverse doit néanmoins s'adapter à des caractéristiques de signaux contraints par un niveau d'émission faible ou par des caractéristiques spectrales non optimales (recopie de vocalises par exemple).

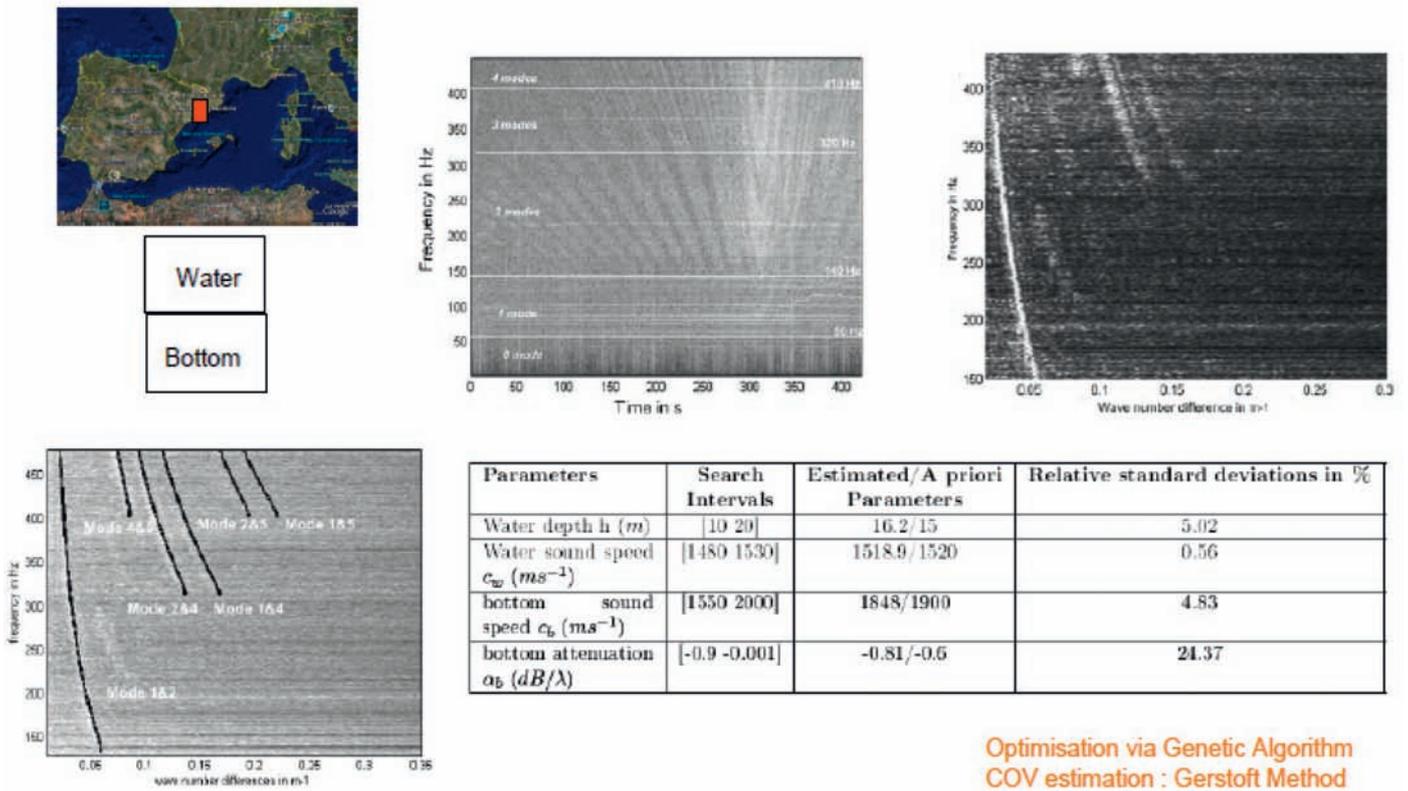


Figure 5 : Inversion d'un canal très petits fonds à partir du bruit rayonné par des bâtiments coopérants (Vallez *et al.*, 2007). Le diagramme temps - fréquence d'un navire en rapprochement est transformé en courbe "fréquence – nombre d'onde relatif". L'interprétation des courbes de dispersion modales permet de remonter aux paramètres du milieu.

3.3.1.2 Tomographie passive

La tomographie passive utilise les sources dites d'opportunité, qui peuvent être des émissions sonars extérieures, des transitoires (vocalises de mammifères marins, craquement de glaces, déferlantes,...), des bruits rayonnés par des navires en mouvement (bruits large bande ou raies spectrales) ou encore du bruit ambiant. On peut distinguer deux types de tomographie passive :

- la tomographie autonome ; le système de tomographie doit détecter, caractériser et localiser les sources de manière autonome. C'est le niveau de complexité le plus élevé. Cela nécessite en particulier d'être capable de détecter et caractériser des sources d'opportunité. Ce point a été traité dans le projet MODE, qui a notamment permis le développement de techniques d'estimation à base d'opérateurs de transformation (voir par exemple Ioana *et al.*, 2006) ;
- la tomographie assistée ; on apporte une aide au système de tomographie soit pour détecter, soit pour caractériser, soit pour localiser les sources (par exemple en utilisant le bruit rayonné par un bâtiment coopérant, dont on connaît la position et/ou les raies spectrales caractéristiques). Ainsi, un des axes explorés dans le projet MODE a démontré que l'on pouvait estimer les paramètres du guide d'onde océanique par petits fonds par inversion du bruit rayonné en large bande par des bâtiments coopérants (Vallez *et al.*, 2007, figure 5).

3.3.2 Le projet CALIMERO

Le premier objectif des systèmes de REA acoustique est de caractériser le milieu par son impact acoustique. Cet objectif se décline par la restitution de "milieux acoustiquement équivalents" c'est-à-dire des milieux qui par construction "collent" à la réalité de la propagation acoustique ("vérité sonar") mais pas forcément à la réalité géophysique ("vérité terrain"). L'inconvénient de cette approche est que ces milieux équivalents ont un domaine de validité restreint aux systèmes utilisés et ne sont pas *a priori* pertinents en cas de changement de systèmes (changement de gamme de fréquence, par exemple). En fait, ce constat ne s'applique pas seulement à un système de REA acoustique mais à l'ensemble des moyens de mesures acoustiques utilisées en caractérisation géophysique (imagerie acoustique, sondeurs de sédiments, systèmes de sismiques,...). En effet, aucun système acoustique pris individuellement ne permet une caractérisation complète des fonds puisque chaque système ne permet de remonter qu'à une description du fond dans son propre spectre d'utilisation. Par exemple, un imageur acoustique, qui exploite la réponse du sédiment à un signal à haute fréquence, ne permet qu'une caractérisation du sédiment superficiel. De manière plus générale, les systèmes exploitent des phénomènes physiques éventuellement différents (réflexion et réverbération en particulier) qu'il est difficile de relier entre eux mais qui apportent une grande complémentarité des observations (figure 6). C'est la

recherche de l'exploitation de cette complémentarité pour aboutir à une représentation unique et cohérente du milieu sédimentaire qui a donné naissance au projet CALIMERO (CALibration des METHodes de Reconnaissance des fonds Océaniques), initiative conjointe du SHOM et de l'Ifremer.

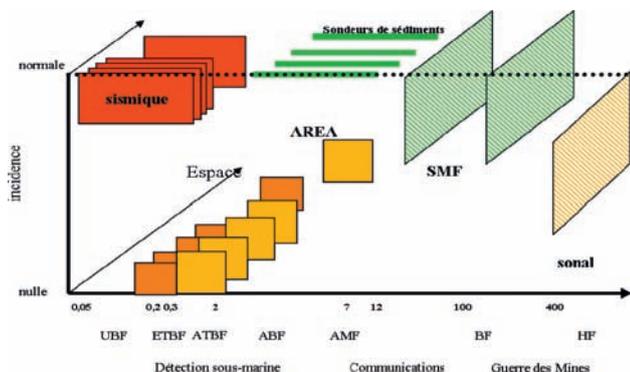


Figure 6 : Couverture de l'espace fréquence – incidence par les différentes familles de systèmes acoustiques. On peut distinguer trois grandes familles : les systèmes sismiques qui exploitent les incidences normales des ultra aux basses fréquences, les systèmes de REA acoustique (AREA) qui exploitent les incidences rasantes aux très basses fréquences et les imageurs acoustiques qui travaillent à haute fréquences.

Le projet CALIMERO (Lurton et Le Gac, 2004) vise à terme l'utilisation conjointe de plusieurs systèmes acoustiques, de caractéristiques fréquentielles différentes et de concept d'emploi complémentaires. Il s'agit de développer des méthodes permettant :

- l'intervalidation des données : il faut s'assurer que les systèmes différents ne conduisent pas à des représentations contradictoires des fonds ;
- la fusion des données : les données issues des différents capteurs, ou les informations relatives au fond issues de leur traitement, doivent être fusionnées pour enrichir le modèle sédimentaire au final ;
- l'extrapolation : en l'absence d'un système de mesures, on doit pouvoir extrapoler les observations d'un autre système afin de compléter le modèle sédimentaire obtenu.

Une première expérience pilote a été réalisée par le SHOM et l'Ifremer en 2004 et 2005. Les travaux ont consisté en un levé exhaustif de trois zones situées dans le golfe du Lion. Tous les moyens acoustiques disponibles au SHOM et à l'Ifremer, complétés par le sonar latéral Klein du GESMA ont été utilisés (figure 7).

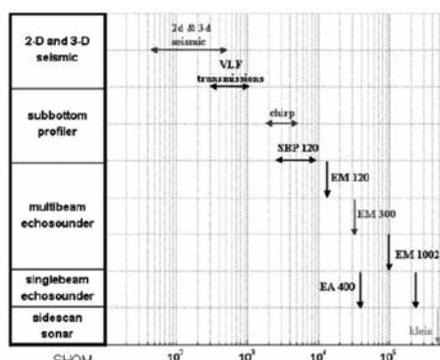
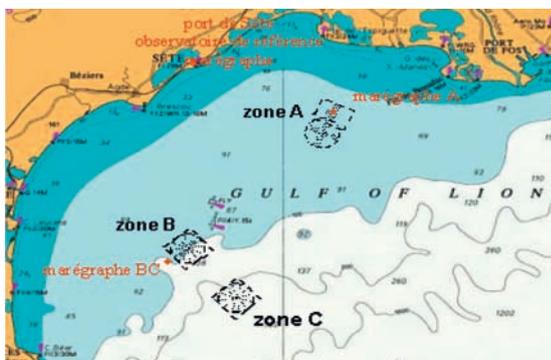


Figure 7 : Zones de levé (à gauche) et instrumentation mise en œuvre (à droite) lors de la campagne CALIMERO.

Les travaux, qui à ce jour ont principalement porté sur l'estimation des paramètres géoacoustiques et la comparaison des méthodes d'inversion pour les différents capteurs, ont montré l'intérêt d'exploiter la complémentarité des capteurs. En effet, les levés par les différents moyens acoustiques se complètent parfaitement. Sur l'exemple de la figure 8, la zone de levé peut ainsi se caractériser par trois régions ; la première région, au sud-est de la zone, est une zone à faible réflectivité (sédiments mous) ; au centre de la zone, une zone sableuse à ridules et enfin une ligne à l'ouest de la zone correspondant à la roche de Sète, affleurement rocheux. Les résultats des traitements montrent que la zone sédimentaire au sud est visible sur l'ensemble des capteurs ; ce n'est pas le cas de la roche de Sète, qui n'est pas visible sur l'imagerie haute fréquence. On peut noter également que la roche de Sète et la zone sédimentaire au sud signent de la même façon sur la réflectivité au sondeur de sédiment (image de droite) mais que l'inversion géoacoustique met en évidence des vitesses de compression très différentes (levé de l'ambiguïté). On peut également noter que la zone de ridules n'est visible qu'à l'imagerie SMF, de résolution décimétrique. Une discussion détaillée de ces comparaisons peut être trouvée en (Theuillon *et al.*, 2007, Theuillon *et al.*, 2008).

Un autre axe de recherche du projet CALIMERO a porté sur la mise au point de méthodes d'estimation des paramètres géoacoustiques (vitesses et atténuation de compression) du milieu à partir des approches sismiques légères. Ces travaux ont notamment reposé sur l'exploitation conjointe des données de sondeurs de sédiments et des techniques d'inversion géoacoustique. En effet, le sondeur de sédiment permet de détecter des couches sédimentaires et d'évaluer l'atténuation des ondes acoustiques. Par contre, il n'est pas possible de remonter directement aux vitesses de compression. A l'inverse, les techniques d'inversion géoacoustique permettent d'obtenir ces vitesses de compression mais restent peu sensibles aux coefficients d'atténuation. Deux approches ont été développées. La première, développée par (Theuillon *et al.*, 2008), permet d'obtenir les coefficients d'atténuation par une technique de rapport de spectres. La seconde, développée par (Plantevin *et al.*, 2009), exploite les réflexions acoustiques sub-critiques dans le sédiment. Elle repose sur l'écoute au point fixe sur un hydrophone de signaux émis par une source à très basse fréquence (inversion géoacoustique). La figure 9 présente une synthèse des résultats au point où était mouillée l'antenne acoustique TELEMAQUE.

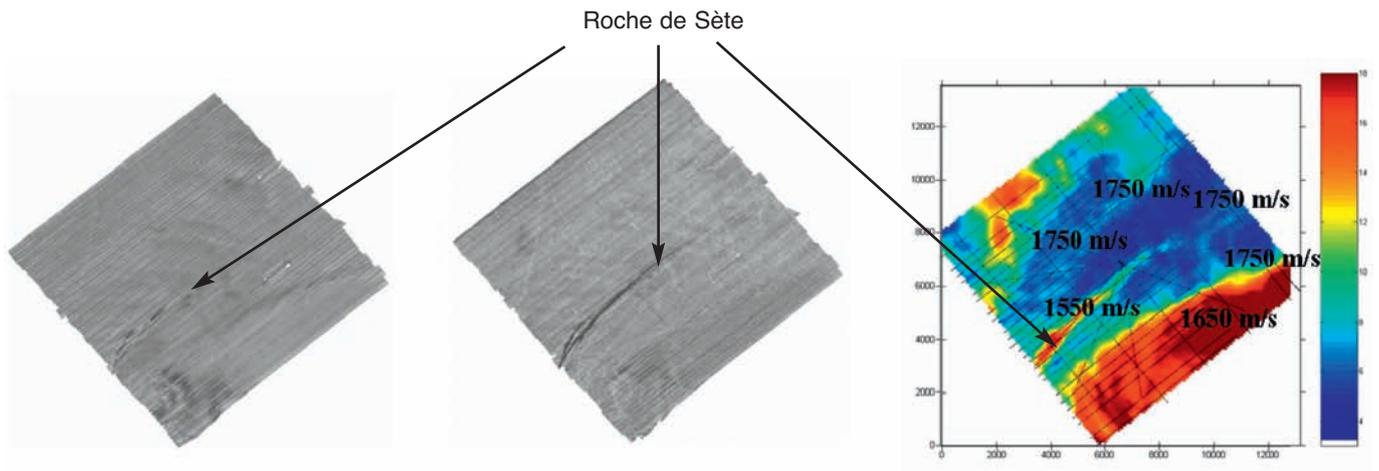


Figure 8 : Mise en évidence de la complémentarité des capteurs acoustiques ; à gauche, image de la zone B obtenue par SMF à 100 kHz ; au centre, même image à 12 kHz ; à droite, carte de réflectivité obtenue par sondeur de sédiment et estimation des vitesses de compression par inversion géoacoustique TBF.

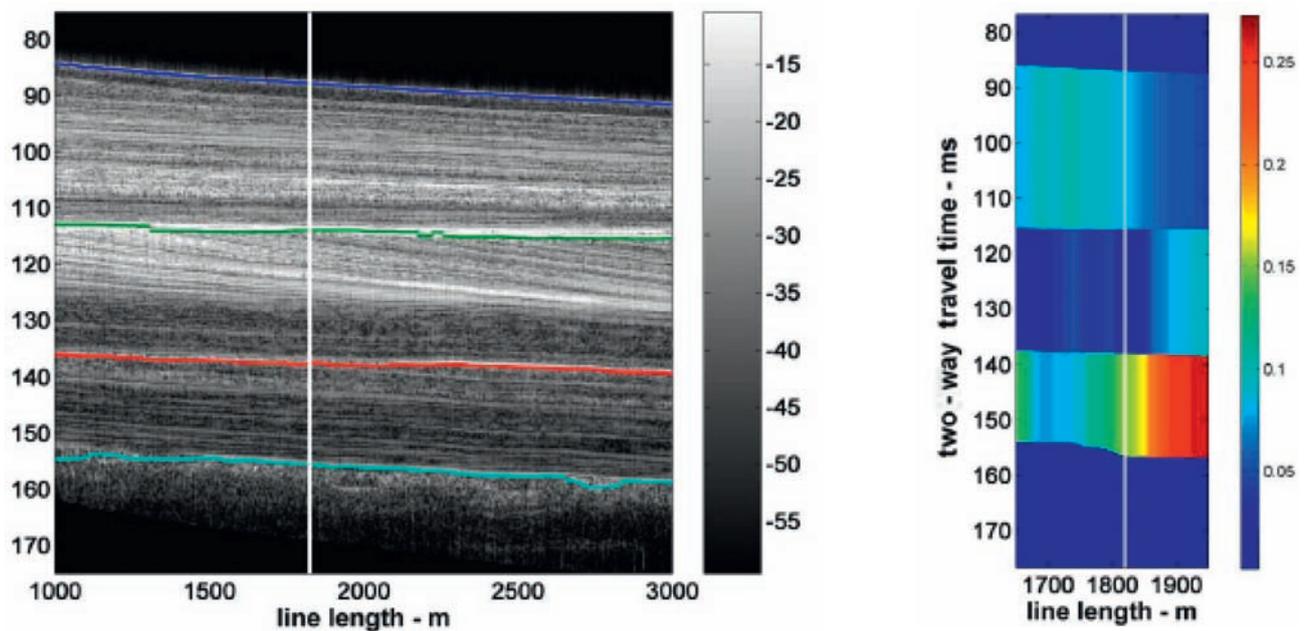


Figure 9 : Caractérisation géoacoustique par approches sismiques légères. L'image de gauche montre le signal reçu par le SBP120 sur une radiale de 2 000 mètres autour de l'antenne de réception acoustique. L'image montre les coefficients d'atténuation au voisinage du point de mesure par la méthode de rapport de spectre (Theuillon *et al.*, 2008). Les épaisseurs des couches sédimentaires et leur vitesse de compression sont obtenues par inversion géoacoustique (Plantevin *et al.*, 2009).

3.3.3 Le projet SIGMAA

Un des inconvénients majeurs des approches inverses en tomographie par petits fonds est que les méthodes utilisées sont le plus souvent des méthodes méta-heuristiques (MH), fondées sur la simulation, souvent très dépendantes du problème considéré. En particulier, ces méthodes nécessitent d'être mises en oeuvre à chaque nouvelle donnée. Si l'on considère un problème ponctuel d'inversion géoacoustique, ces approches sont très satisfaisantes. Pour du levé de zone, qui nécessite de déplacer souvent les capteurs ou d'exploiter le mouvement de ceux-ci, les méthodes méta-heuristiques peuvent se révéler lourdes et au final peu adap-

tées. Une alternative aux méthodes MH est l'inversion variationnelle par modélisation adjointe (Le Gac, 2003). L'idée sous-jacente est d'appliquer au problème de l'inversion géoacoustique les techniques de modélisation adjointe classiquement utilisées en océanographie. La résolution du problème inverse de tomographie par des méthodes variationnelles utilisant l'opérateur adjoint du modèle acoustique présente en effet un triple intérêt :

- par opposition aux méthodes MH, elle propose un formalisme mathématique rigoureux pour l'inversion, formalisme qui est généralisable à tout type d'environnement (fond variable, colonne d'eau,...) que ce soit en inversion ou en assimilation de données ;

- elle permet plus facilement et plus rigoureusement d'inclure la physique des phénomènes, l'information *a priori* sur le milieu et la dynamique des observations ;
- elle minimise le recours à la simulation du problème direct, ce qui réduit notablement les temps de calcul.

Montrer la faisabilité d'une approche systémique de l'inversion géoacoustique par modélisation adjointe a fait l'objet du projet de recherche SIGMAA (Système d'Inversion Géoacoustique par Modélisation Adjointe Automatique), collaboration entre le SHOM, l'Université Pierre et Marie Curie, l'Université Jules Verne de Picardie et l'Université Libre de Bruxelles.

Les travaux menés dans le cadre du projet SIGMAA ont permis d'apporter la démonstration qu'une approche adjointe, basée sur des équations de la propagation d'ondes acoustiques, peut fournir une base mathématique commune pour la résolution de problèmes inverses en acoustique sous-marine tant pour l'inversion géoacoustique (paramètres du fond marin) que pour la tomographie acoustique (paramètres de la colonne d'eau). L'approche développée exploite un modèle général de la propagation (modèle WAPE, équation parabolique grand angle avec conditions aux frontières non locales) pour lequel un adjoint semi-automatique, obtenu par le générateur d'adjoint YAO (Nardi *et al.*, 2009) a été développé en se basant sur la théorie des graphes modulaires (Hermand *et al.*, 2006b). Ce modèle direct permet de faire intervenir explicitement les paramètres acoustiques de la colonne d'eau et du fond dans la résolution du problème inverse (gradient de la fonction de coût obtenu par rétro-propagation). Le développement et la validation d'un schéma d'optimisation conjointe sur un nombre arbitraire de fréquences permettent d'obtenir des résultats robustes (Hermand *et al.*, 2006a, Hermand *et al.*, 2006c) et pouvant être *a priori* aisément implémentés sur des calculateurs parallèles.

Cette méthodologie adjointe a pu être appliquée avec succès à l'environnement complexe de la campagne Yellow Shark de 1994 (YS94) menée par le NATO Undersea Research Center (NURC) au sud de l'île d'Elbe (par exemple Hermand, 1999). La figure 10 montre les résultats obtenus sur ces don-

nées réelles (Meyer *et al.*, 2007) pour trois paramètres géoacoustiques. Les résultats, ainsi que de nombreux autres non repris ici (par exemple Badran *et al.*, 2008) montrent que la méthode permet une inversion précise des paramètres géoacoustiques et du profil de célérité. Comme toute méthode locale, elle reste cependant dépendante des conditions initiales (solutions *a priori*). Pour que l'inversion converge vers le minimum global, il est nécessaire que la connaissance *a priori* apportée au système soit suffisamment proche de la solution réelle.

3.4 Discussion et perspectives

La mise au point des techniques d'évaluation rapide de l'environnement océano-acoustique et leur intégration dans des systèmes intégrés constituent l'axe principal des recherches conduites au SHOM dans le domaine de l'océanographie acoustique. Si la démonstration du concept de REA acoustique actif est faite, il faut poursuivre dans la recherche de solutions techniques et technologiques permettant d'envisager à moyen terme un emploi opérationnel. Cette préoccupation a permis de définir pour les années à venir les thèmes de recherche qui seront conduits. En particulier, les techniques de tomographie côtière doivent être enrichies par des visions complémentaires afin d'aboutir à une caractérisation physique de l'environnement. Cet enrichissement pourra se faire par des techniques de fusion d'observation multicapteurs (cf. CALIMERO) et par des techniques d'inclusion au problème inverse de la physique de l'environnement (assimilation de données acoustiques dans les modèles physiques). Une fois mise au point, ces techniques devront s'appliquer à des concepts d'emploi opérationnel réalistes. Des techniques de caractérisation du milieu devront s'adapter aux concepts émergents d'observatoires côtiers aux techniques de collecte et de diffusion des données (réseau d'observation, AUV) et aux contraintes associées à cette collecte (non intrusion, non pollution sonore,...). Ces axes de recherches font l'objet du programme d'études amont ERATO en cours au SHOM.

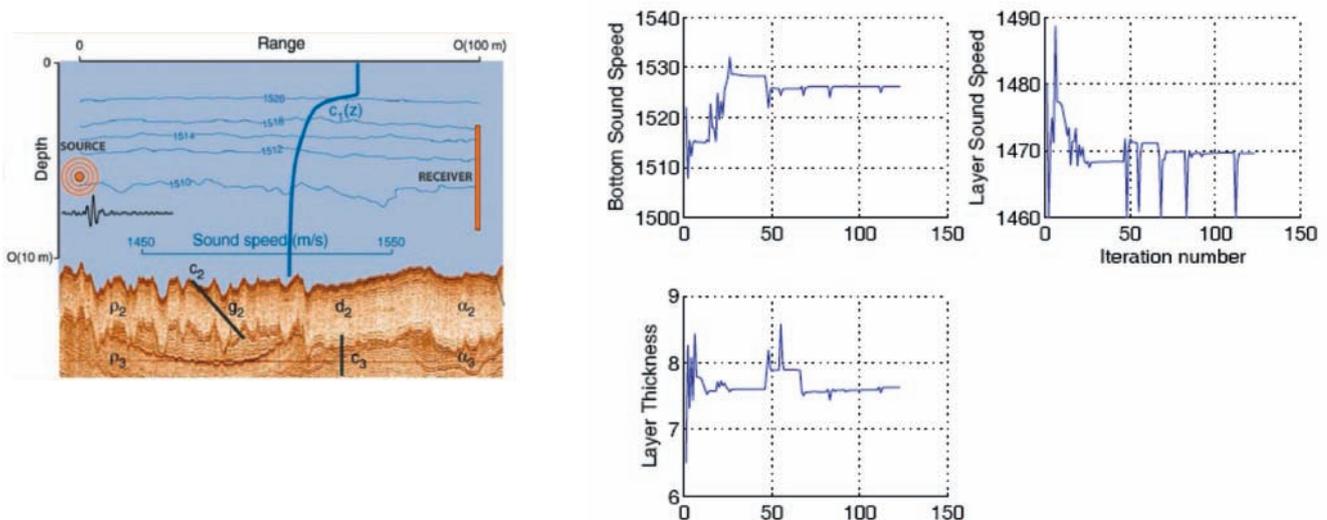


Figure 10 : Environnement de la campagne Yellow Shark'94 (Hermand, 1999) et inversion des paramètres géoacoustiques par application de la méthodologie adjointe aux données réelles de la campagne YS'94 (huit hydrophones en réception).

4. CONCLUSION ET PESPCTIVES

Le SHOM a développé une compétence en acoustique sous-marine essentiellement pour les applications d'observations du milieu par techniques acoustiques (tomographie acoustique). Cette compétence s'est par la suite étoffée à l'impact de l'environnement sur les sonars afin de mieux répondre au besoin de la marine en matière de prévision et d'exploitation des performances de sonars de détection sous-marine. Plus récemment, le SHOM s'est vu confier la gestion opérationnelle des bases de données de bruit ambiant à des fins de production et de prévision opérationnelle de cette grandeur pour les forces navales. Le SHOM dispose d'une expérience forte d'une vingtaine d'années d'études et recherches en océanographie acoustique. Cette expérience s'est enrichie par de nombreuses expérimentations, souvent en partenariat avec des organismes et laboratoires étrangers civils ou militaires. Si ces expertises s'exercent principalement pour les besoins militaires, elles ont aussi vocation à être valorisées pour les problématiques duales. Alors que l'acoustique sous-marine a souvent été l'affaire de sonaristes, des nouvelles applications civiles émergent pour la gestion intégrée des ressources et la surveillance des écosystèmes. La tomographie discrète, qui peut permettre un monitoring permanent, non intrusif de certaines zones sensibles ou protégées comme les parcs marins, peut apporter des réponses adaptées au besoin. De manière plus générale, on semble bien loin d'avoir exploité tout le potentiel des techniques d'observation acoustique du milieu, comme en témoigne la variété des applications potentielles abordées lors du séminaire SERENADE.

BIBLIOGRAPHIE

- BADRAN F., BERRADA M., BRAJARD J., CRÉPON M., SORROR C., THIRIA S., HERMAND J-P., MEYER M., PERICHON L., ASCH M. (2008): "Inversion of satellite ocean colour imagery and geoacoustic characterization of seabed properties: Variational data inversion using a semi-automatic adjoint approach". *Journal of Marine Systems* (vol. 69, 126–136).
- CROS L., IOANA C., QUINQUIS A. (2005): "Synthesis from underwater data: application to the oceanic discrete tomography". *Proc. of IEEE OCEANS'05* (vol. 1, 507- 510).
- GROUSSON R. (1955) : "La propagation du son dans le chenal sonore". *Annales Hydrographiques* (4^e série, tome 6, p. 353-369).
- GERVAISE C., VALLEZ S., STÉPHAN Y., SIMARD Y. (2007): "Passive acoustic tomography: an efficient way to reduce acoustic emission in tomographic process - review, new concept & applications using marine mammals vocalises". *Journal of the Marine Biological Association of United Kingdom* (87, 5-10).
- HERMAND J-P. (1999): "Broad-band geoacoustic inversion in shallow water from waveguide impulse response measurements on a single hydrophone: theory and experimental results". *IEEE Journal of Oceanic Engineering* (24 (1), 41–66).
- HERMAND J-P., MEYER M., ASCH M., BERRADA M. (2006a): "Adjoint-based acoustic inversion for the physical characterization of a shallow water environment". *Journal of the Acoustical Society of America* (119 (6), 3860-3871).
- HERMAND J-P., MEYER M., ASCH M., BERRADA M., SORROR C., THIRIA S., BADRAN F., STÉPHAN Y. (2006b): "Semi-automatic adjoint PE modelling for geoacoustic inversion". *Seventh International Conference on Theoretical and Computational Acoustics* (E.C. Shang, D. Lee, A. Tolstoy and Y.C. Teng, editors, Seventh International Conference on Theoretical and Computational Acoustics).
- HERMAND J-P., MEYER M., ASCH M. et BERRADA M. (2006c): "Adjoint-based shallow water tomography with partially known bottom properties". In *Proc. of OCEANS '06 Asia Pacific, IEEE*.
- IOANA C., QUINQUIS A., STÉPHAN Y. (2006): "Feature extraction from underwater signals using time-frequency warping operators". *IEEE Journal of Oceanic Engineering* (vol. 31, 3, 628-645).
- LACOMBE H. (1946) : "La propagation du son dans ses rapports avec le repérage radio-électrique". *Annales Hydrographiques* (3^e série, tome 18, p. 71-90).
- LE GAC J-C. (2003) : "Deux approches de l'inversion géoacoustique : inversion par signaux large bande et approche variationnelle". Thèse de l'Université de Toulon-Var.
- LURTON X. et LE GAC J-C. (2004): "The CALIMERO project: Scientific objectives and first at-sea results". In *Situ Seabed Characterization*. (Proc. 1st Sea Tech. Week, Brest, France).
- MEYER M., HERMAND J-P., BERRADA M. et ASCH M. (2007): "Adjoint-based monitoring of environmental parameters in shallow water areas". *Proceedings of the 2nd International Conference on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results* (J. S. Papadakis and L. Bjorno, eds.), IACM/FORTH.
- MOREL Y. (2010) : "Les axes de recherche au SHOM". *Annales Hydrographiques* (vol. 6, n° 775, p 2.1-2.28).
- MUNK W., WUNSCH C. (1979): "Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring". *Deep-Sea Research*, (26A, p. 123-161).
- NARDI L., SORROR C., BADRAN F., THIRIA S. (2009): "YAO: A Software for Variational Data Assimilation Using Numerical Models" in *Computational Science and Its Applications* (2, 621-636).
- RABASTE O., CHONAVEL T. (2008) : "Estimation du canal acoustique sous-marin pour la tomographie acoustique par petits fonds". *Traitement du signal* (vol. 25, n° 1-2, pp. 139-150).
- PLANTEVIN P., LE GAC J-C., AUGER E., THEUILLON G., STÉPHAN Y. (2009): "A joint seismo-geoacoustic inversion in shallow water using a subsurface towed sound source". *Journal of Marine Systems* (78, S321-S332).

STÉPHAN Y. (1998) : "Fiche d'exploitation des données acoustiques de la campagne GASTOM90". Fiche technique 06/EPHOM/CMO/OCA/.., Service hydrographique et océanographique de la marine (37 pages).

STÉPHAN Y., DEMOULIN X., FOLÉGOT T., JESUS S., PORTER M., COELHO E. (2000): "Acoustical effects of internal tides on shallow water propagation: An overview of the INTIMATE96 experiment" in *Experimental Acoustics Inversion Methods for Exploration of the Shallow Water Environment* (Caiti, Hermand, Jesus and Porter (eds.), KLUWER, 19-38).

STÉPHAN Y. (2010) : "La tomographie acoustique océanique : technique du passé ou de l'avenir ?" (dans ce même numéro).

STÉPHAN Y., GERVAISE C. et LIRET C. (2010) : "Surveillance, étude et reconnaissance de l'environnement par acoustique discrète : le séminaire SERENADE" (dans ce même numéro).

THEUILLON G., STÉPHAN Y., LURTON X. (2007): "Multisensor geoacoustic inversion applied to the CALIMERO experiment in the gulf of Lion". *Proc. Underwater Acoustic Measurement*, Heraklion, Grèce.

THEUILLON G., STÉPHAN Y., PACAULT A. (2008): "High resolution characterization of the sea floor using a subbottom profiler in the gulf of Lion". *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, (vol. 33, 3, 240-254).

VALLEZ S. GERVAISE C., KENCHAF A., STÉPHAN Y., ANDRÉ M. (2007) : "Inversion géoacoustique d'un canal par très petits fonds: traitement incohérent". *Traitement du Signal* (25, n° 1, 151-163).

SURVEILLANCE, ETUDE ET RECONNAISSANCE DE L'ENVIRONNEMENT PAR ACOUSTIQUE DISCRÈTE : LE SÉMINAIRE SERENADE

par Yann Stéphan ⁽¹⁾, Cédric Gervaise ⁽²⁾ et Céline Liret ⁽³⁾

RÉSUMÉ

Les techniques de monitoring du milieu par acoustique passive et discrète font l'objet de nombreuses initiatives de recherche et développement. Dans le cadre du Groupement d'Intérêt Scientifique Europôle Mer (GIS-EM), l'ENSIETA, le SHOM et Océanopolis ont co-organisé à Brest le séminaire SERENADE ayant pour but de dresser un état de l'art dans le domaine de la surveillance acoustique du milieu marin, de confronter les points de vue et de dégager des perspectives de collaborations pour les années futures.

ABSTRACT

Monitoring the environment with non intrusive acoustic techniques is the subject of many research initiatives worldwide. In the framework of the scientific interest group "Europôle Mer (GIS-EM)", ENSIETA, SHOM and Océanopolis co-organized the SERENADE workshop in Brest. This workshop has enabled to provide a state of the art in the field of acoustic monitoring of marine environment, to share the points of view from various scientific communities and to identify prospects for collaborations in the next future.

(1) SHOM, 13 rue du Chatellier, CS92803, 29228 Brest Cedex 2, France.

(2) EA3876 et DTN, ENSIETA, 2 Rue François Verny, 29200 Brest, France.

(3) Océanopolis, port de plaisance du Moulin Blanc, 29200 Brest, France.

1. ÉCOUTER POUR COMPRENDRE...

L'océan est bien connu pour être un excellent guide pour les ondes acoustiques. Les progrès technologiques de la deuxième moitié du vingtième siècle ont permis la mise au point de systèmes exploitant cette propriété, les sonars. Les premières applications de ces systèmes ont été la détection et la localisation de cibles que ce soit des cibles d'origine anthropique (sous-marins, bâtiments, mines,...) ou naturelle (bancs de poissons, fonds sous-marins,...). Fort de ces systèmes permettant de scruter l'océan, d'autres applications ont vu le jour, visant à extraire une information environnementale des signaux acoustiques propagés, réfléchis ou réverbérés dans le milieu. Ce sont par exemple les systèmes de tomographie, de caractérisation sédimentaire, d'exploration sismique ou encore de courantométrie acoustique. Il ne s'agit plus seulement de détecter et localiser, mais de quantifier et caractériser les paramètres physiques, chimiques ou biologiques de l'océan.

Si la maîtrise des systèmes acoustiques sous-marins permet maintenant d'appréhender le milieu en y injectant des signaux sonores, l'introduction d'énergie sonore dans l'océan n'est pas toujours sans poser problème comme en témoigne les polémiques récentes autour de l'impact potentiel sur la faune de sources acoustiques à forte puissance. De manière générale, si l'acoustique active, c'est à dire ayant recours à l'émission dans le milieu de signaux sonores contrôlés, est un outil indispensable à l'acquisition de la connaissance des océans, elle constitue une forme d'intrusion dans le milieu, intrusion dont l'impact à la fois opérationnel et écologique peut s'avérer gênant voire dans certains cas rédhibitoire. Pour limiter cet impact, il est assez naturel de rechercher des solutions techniques limitant l'introduction d'énergie sonore. En matière d'observation acoustique du milieu marin, un des enjeux des prochaines décennies sera probablement de développer notre capacité à "observer en silence", en toute discrétion acoustique...

Comment faire face à cet enjeu ? Et si finalement, la réponse venait de l'océan lui-même ? Tout baigneur ou plongeur sous-marin en a fait l'expérience : bien loin du "monde du silence", l'océan est le siège d'une activité sonore intense et permanente. Si, pour un non-initié, ce chorus peut s'apparenter à une espèce de brouhaha au mieux amusant, probablement intrigant ou au pire inquiétant, les initiés à l'acoustique sous-marine connaissent la richesse de ce chorus océanique. Toutes sortes de bruits s'y côtoient comme les bruits d'origine météorologique (générés par le vent ou la pluie), les bruits d'origine sismique ou volcanique, les bruits d'origine anthropique (trafic maritime, exploration pétrolière, détection sous-marine,...) ou encore les bruits d'origine biologiques (vocalises de mammifères marins, claquements de crevettes et de coquillages,...). Ce chorus océanique possède un contenu informatif gigantesque et encore largement inexploité sur la connaissance du milieu marin, sa biodiversité, son évolution ou encore ses processus physiques... A condition bien entendu de savoir le décoder... Et si finalement, il suffisait d'écouter pour comprendre ?...

Cette idée d'écouter les océans n'est pas nouvelle et des observatoires acoustiques passifs sont utilisés depuis plusieurs décennies. Néanmoins, les efforts consentis pour le

développement et l'exploitation de ces observatoires l'ont été d'une manière relativement ciblée dans des domaines applicatifs bien bornés. Le besoin d'observation des environnements côtiers est de nature à inverser cette tendance. En effet, contrairement à certaines idées reçues, les zones côtières et littorales sont sûrement moins connues et souvent moins accessibles que les environnements profonds. Or, la connaissance de ces zones revêt des enjeux économiques et écologiques importants et suscite une demande très soutenue des "usagers" des océans. Cette demande peut s'exercer dans des domaines très variés (pollution marine, sécurité maritime, gestion intégrée des littoraux, surveillance des habitats et de la biodiversité,...), sur toutes les échelles spatiales et temporelles, à de multiples niveaux d'utilisateurs (scientifiques, exploitants, pouvoirs publics, industriels, ...). Cette demande s'exerce par ailleurs sous fortes contraintes puisque l'acquisition de données dans les zones côtières nécessite de répondre à de multiples obligations de nature réglementaire (limitation des eaux territoriales, zones économiques exclusives, présences d'aires marines protégées, directives européennes, droit maritime,...) et doit se faire en bonne harmonie avec des activités anthropiques souvent intenses (pêche, trafic maritime, loisirs, exploitation industrielle de sites,...). Face à un manque abyssal de connaissance en zones de faible profondeur se pose la nécessité de développer des outils d'observation permettant de répondre à un spectre large d'applications. En ce sens, l'acoustique discrète est un outil qui mérite assurément d'être développé pour au moins trois raisons :

- la richesse de la donnée : les enregistrements acoustiques permettent d'assurer un monitoring continu sur plusieurs mois. Ils sont non invasifs et, par nature, intégrés si l'on considère des hydrophones de très large bande. En effet, le même son, donc la même donnée, peut servir au biologiste, qui dénombre des mammifères, au géophysicien, qui mesurera une activité sismique ou à l'océanographe qui estimera un contenu thermique. Il est également assez remarquable qu'une même donnée puisse être un indicateur de pression anthropique (par exemple le bruit généré par des sources impulsives) et un indicateur de son impact (par exemple une densité de vocalisation) ;
- la complémentarité avec les autres techniques d'observation ; les enregistrements acoustiques apportent une "autre" vision que les systèmes de mesures physiques. Par exemple, les mammifères marins ne passent qu'une partie de leur temps en surface (moins de 10 % pour les grands dauphins). La détection et l'étude de leur activité sonore permettent d'apporter un angle d'étude complémentaire sur le recensement des populations et les comportements. Pour autre exemple, citons également le fait que trois quarts de l'activité sismique sous-marine est de magnitude faible et difficilement mesurable par les sismographes, peu sensibles aux petits mouvements terrestres. Par contre, le bruit sous-marin généré par les petits séismes s'entend souvent très distinctement sur des hydrophones aux fréquences dites ultra basses (de quelques hertz à quelques dizaines de hertz).
- la maturité technologique : si le développement et l'exploitation des systèmes actifs restent relativement lourds, l'observation par techniques passives est par contre très accessible. Nombre de systèmes autonomes existent sur étagères pour quelques milliers d'euros et sont d'emploi très simple. Le recours systématique à des techniques discrètes peut au final se révéler peu coûteux et procurer un rapport information/coût parmi les plus intéressants.

L'acoustique discrète présente des avantages indéniables. Cependant, l'impossibilité de travailler avec des signaux optimaux rend nécessaire des développements originaux en traitement du signal. Pour s'adapter au contexte scientifique difficile du discret et du passif, de nouvelles méthodologies et concept d'emploi doivent être pensés, en étroite collaboration entre acousticiens, traiteurs de signaux et environnementalistes. Pour profiter des promesses de l'acoustique discrète, il faudra impérativement tisser des liens étroits entre les différentes communautés scientifiques. C'est en tout cas dans cet esprit que le séminaire SERENADE a vu le jour...

2. SURVEILLER, ÉTUDIER ET RECONNAÎTRE L'ENVIRONNEMENT PAR L'ACOUSTIQUE DISCRÈTE

Les techniques de monitoring du milieu par acoustique passive et discrète font actuellement l'objet de nombreuses initiatives de recherche et développement, tant pour l'observation physique de l'environnement que pour l'étude et la protection de son écosystème ou encore la surveillance des activités humaines et de leur impact. Dans le cadre du Groupement d'Intérêt Scientifique Europôle Mer (GIS-EM), l'ENSIETA, le SHOM et Océanopolis se sont associés pour conduire le projet "MER CALME" qui poursuit trois axes :

- d'une part, montrer l'intérêt et la faisabilité de l'acoustique passive pour l'étude de la population des grands dauphins sur le site de l'archipel de Molène,
- d'autre part, montrer l'intérêt et la faisabilité du suivi par acoustique passive du front d'Ouessant,
- enfin, promouvoir les échanges scientifiques entre les principaux acteurs de la région brestoise et différentes équipes de recherche à l'étranger investies dans l'utilisation des techniques acoustiques de monitoring environnemental.

Un des vecteurs retenus pour ce troisième axe était la tenue d'un séminaire de travail ayant pour but de dresser un état de l'art dans le domaine de la surveillance acoustique du milieu marin, de confronter les points de vue et de dégager des perspectives de collaborations pour les années futures. C'est à ces fins qu'a été organisé le séminaire SERENADE, qui s'est tenu les 17 et 18 mars 2010 à l'École nationale supérieure des ingénieurs en techniques d'armement (ENSIETA) à Brest. Ce séminaire a comporté des présentations orales (une vingtaine de minutes et dix minutes de questions) ainsi que des débats et discussions libres sur les techniques de monitoring acoustique, les besoins des utilisateurs et les perspectives de travail.

La première journée du séminaire a été consacrée à l'application de techniques discrètes à l'observation de l'écosystème marin. Le second jour a porté sur la caractérisation physique des océans par acoustique discrète. Au final, le séminaire a rassemblé plus de quarante participants d'horizons divers représentant 4 organismes étrangers, 4 organismes nationaux, 9 organismes membres du GIS ainsi que 2 PME. La qualité et la diversité de l'audience ont rendu possible la confrontation des expériences des uns et des autres et le partage d'idées entre biologistes, géophysiciens, océanographes, acousticiens et traiteurs de signaux. Les présentations, de grande qualité, ont permis de montrer le spectre

fantastique d'application de l'acoustique discrète, de l'étude des animaux les plus petits, comme les poissons clowns ou les coquilles Saint-Jacques aux plus grands, comme les baleines bleues, de la dynamique sédimentaire des estuaires aux mouvements tectoniques dans les abysses.

Pour garder trace écrite de la richesse des débats et de la diversité des sujets abordés, le SHOM a le plaisir de consacrer au séminaire SERENADE le numéro spécial 776 de ses *Annales Hydrographiques*, disponible en ligne (www.shom.fr, rubriques "Annales hydrographiques"). En espérant que les participants et les futurs lecteurs puissent y trouver de nombreuses sources d'inspiration !

REMERCIEMENTS

Ce séminaire a été organisé sous l'égide du GIS Europôle Mer (axe 5) et grâce à son soutien financier dans le cadre du contrat n° 08/2210208. Les organisateurs remercient chaleureusement l'ensemble des participants et contributeurs pour avoir rendu ce séminaire aussi riche et aussi convivial.

Liste des interventions

Titre	Auteurs (intervenant en souligné)	Organisme	Contact
Observation des populations de cétacés : cas des dauphins de l'Iroise	<u>C. LIRET</u>	Océanopolis, LEMM ¹ (F)	celine.liret@oceanopolis.com
Observatoire acoustique des grandes baleines dans les océans Indien et Austral	<u>F. SAMARAN</u> O. ADAM J-Y. ROYER C. GUINET	Centre d'Etudes Biologiques de Chizé (F) Université de Paris Sud 11 (F) IUEM/LDO ² (F) Centre d'Études Biologiques de Chizé	flore.samaran@cebc.cnrs.fr
Communication acoustique des grandes baleines et activités sonores anthropiques	<u>L. DI IORIO</u> C.W. CLARK L. HATCH S. VAN PARJIS	ENSIETA/DTN ³ (F) Cornell Bioacous. Research Lab (USA) NOAA ⁴ (USA) NOAA (USA)	lucia.di_iorio@ensieta.fr
Apport de l'acoustique passive pour l'éthologie de la coquille Saint-Jacques	<u>C. GERVAISE</u> B. KINDA S. BUSSON V. JAUD <u>L. CHAUVAUD</u> T. ROBSON	ENSIETA/DTN (F) ENSIETA/DTN (F) ENSIETA/DTN (F) ENSIETA/DTN (F) IUEM/LEMAR ⁵ (F) IUEM/LEMAR (F)	cedric.gervaise@ensieta.fr
Communication acoustique chez des poissons	<u>L. KÉVER</u>	Université de Liège (B)	loic.kever@student.ulg.ac.be
Observation de la posidonie par acoustique	<u>J-P. HERMAND</u>	Université Libre de Bruxelles, EHL (B)	jhermand@ulb.ac.be
Détection des clics des baleines à bec	<u>O. GÉRARD</u> C. CARTHEL S. CORALUPPI	DGA Techniques Navales (F) NURC ⁶ (OTAN) NURC (OTAN)	odile.gerard@dga.defense.gouv.fr
Campagne Erato'09 : émissions acoustiques et présence des mammifères marins sur le plateau continental	<u>L. DI IORIO</u> B. KINDA C. GERVAISE Y. STÉPHAN N. JOSSO	ENSIETA/DTN (F) ENSIETA/DTN (F) ENSIETA/DTN (F) SHOM (F) GIPSA-LAB ⁷ Grenoble (F)	lucia.di_iorio@ensieta.fr
Émissions SONAR et mammifères marins : peuplement dans le golfe de Gascogne et en mer Méditerranée Occidentale	L. MIFSUD <u>O. GÉRARD</u>	DGA Techniques Navales (F) DGA Techniques Navales (F)	laurent.mifsud@dga.defense.gouv.fr
Observations acoustiques : exemples d'applications et défis DCL dans le Saint-Laurent	<u>Y. SIMARD</u> N. ROY	Institut des Sciences de la Mer, Québec (CA) Pêches et Océans Canada, Québec (CA)	yvan.simard@dfo-mpo.gc.ca
Vers la prévision du bruit anthropique	<u>T. FOLÉGOT</u>	QUIET-OCEANS (F)	thomas.folegot@gmail.com
Tomographie acoustique : technique du passé ou du futur ?	<u>Y. STÉPHAN</u> J-P. HERMAND C. GERVAISE	SHOM (F) Université Libre de Bruxelles, EHL (B) ENSIETA/DTN (F)	yann.stephan@shom.fr

Titre	Auteurs (intervenant en souligné)	Organisme	Contact
Acoustique et océanographie opérationnelle	<u>Y. STÉPHAN</u>	SHOM (F)	yann.stephan@shom.fr
Acoustic data assimilation : the Ushant front monitoring	<u>O. CARRIERE</u> J-P. HERMAND Y. STÉPHAN	Université Libre de Bruxelles, EHL (B) Université Libre de Bruxelles, EHL (B) SHOM (F)	ocarrier@ulb.ac.be
Inversion géoacoustique à partir du bruit large bande rayonné par les navires	<u>B. KINDA</u> C. GERVAISE Y. STÉPHAN C. CHAILLOUX	ENSIETA/DTN (F) ENSIETA/DTN (F) SHOM (F) ENSIETA/DTN (F)	basile.kind@ensieta.fr
Shallow water inversion on a single receiver using warping tools	J. BONNEL B. NICOLAS <u>J-I. MARS</u> D. FATTACCIOLI	GIPSA-LAB, Grenoble (F) GIPSA-LAB, Grenoble (F) GIPSA-LAB, Grenoble (F) DGA Techniques Navales (F)	julien.bonnel@gipsa-lab.grenoble-inp.fr
Acoustique pour l'observation de l'activité sismique	<u>J.-Y. ROYER</u> J. GOSLIN J. PERROT C. GUENNOU J-F. D'EU C. BRACHET	IUEM/LDO (F) IUEM/LDO (F) IUEM/LDO (F) IUEM/LDO (F) IUEM/LDO (F) IUEM/LDO (F)	jean-yves.royer@univ-brest.fr
Acoustique et dynamique sédimentaire	<u>J-P. HERMAND</u>	Université Libre de Bruxelles, EHL (B)	jhermand@ulb.ac.be
Etude de la surface à partir de mesures acoustiques passives	<u>X. DEMOULIN</u>	MAREE ⁸ (F)	xdemoulin@maree.fr
MeDON ⁹ et observatoire côtier câblé	<u>Y. Aoustin</u>	Ifremer (F)	yannick.aoustin@ifremer.fr
Observatoire acoustique ESONET-LIDO ¹⁰	M. ANDRÉ <u>C. GERVAISE</u>	Universidad Politecnica de Cataluya (E) ENSIETA/DTN (F)	cedric.gervaise@ensieta.fr

¹ Laboratoire d'Étude des Mammifères Marins.

² Institut Universitaire Européen de la Mer/Laboratoire des Domaines Océaniques.

³ École Nationale Supérieure des Ingénieurs en Études et Techniques d'Armement/Développement des Techniques Nouvelles.

⁴ National Oceanic and Atmospheric Administration.

⁵ IUEM/Laboratoire de l'Environnement MARin.

⁶ Nato Undersea Research Center (La Spèzia - Italie).

⁷ Grenoble Image Parole Signal Automatique - Laboratoire.

⁸ Méthodes Acoustiques de REconnaissance de l'Environnement.

⁹ Marine e-Data Observatory Network.

¹⁰ European Seas Observatory NETWORK - Listening to the Deep Ocean environment.

LA TOMOGRAPHIE ACOUSTIQUE OCÉANIQUE : TECHNIQUE DU PASSÉ OU DE L'AVENIR ?

par Yann Stéphan ⁽¹⁾, Jean-Pierre Hermand ⁽²⁾ et Cédric Gervaise ⁽³⁾

RÉSUMÉ

Le concept de tomographie acoustique de bassin, né il y a une trentaine d'années, a suscité un engouement très fort à la fin du vingtième siècle. Cet engouement est sensiblement retombé depuis et le concept n'a pas débouché sur de réelles applications opérationnelles. L'intérêt très fort suscité depuis une dizaine d'années pour les zones côtières, que ce soit pour des applications civiles ou militaires, a fait émerger de nouveaux concepts de tomographie comme l'évaluation rapide de l'environnement et la tomographie côtière, active et discrète. Quels sont les évolutions prévisibles à court et moyen termes de ces différents concepts ? Cet article propose des pistes de réflexion pour les développements futurs des concepts et systèmes de tomographie du milieu marin.

ABSTRACT

The concept of basin scale ocean acoustic tomography, born thirty years ago, generated a strong enthusiasm in late twentieth century. This enthusiasm fell as the concept did not lead to operational applications. Since a decade the interest for coastal areas, either for civilian or military applications rose again with the new concepts of rapid environmental assessment and coastal tomography, active and discrete. What are the expected evolutions in the short and medium terms of these concepts? This paper explores some future developments for concept and systems of maritime tomography.

(1) SHOM, 13 rue du Chatellier, CS92803, 29228 Brest Cedex 2, France. (Email : yann.stephan@shom.fr)

(2) Environmental Hydroacoustics Lab. Université libre de Bruxelles (U.L.B.), avenue Franklin D. Roosevelt, 50 - CP 194/05, 1050 Bruxelles, Belgique. (Email : jhermand@ulb.ac.be)

(3) EA3876 et DTN, ENSIETA, 2 rue François Verny, 29200 Brest, France. (Email: cedric.gervaise@ensieta.fr)

1. INTRODUCTION

L'observation et la prévision du comportement du milieu marin sont des disciplines en plein essor depuis plusieurs décennies. Cet essor, qui s'est accompagné d'importants développements technologiques, s'est notamment traduit par la multiplication des systèmes d'observation des océans que ce soit les systèmes de mesure *in situ* ou les systèmes de mesures satellitaires. A l'échelle des bassins océaniques, une difficulté majeure à l'observation de l'intérieur de l'océan réside dans le manque de moyens de mesures synoptiques, c'est-à-dire capables de caractériser à un instant donné un large volume océanique. La Tomographie Acoustique Océanique (TAO) est née de ce besoin (Munk & Wunsch, 1979). La tomographie acoustique repose sur la mesure de temps de propagation de signaux acoustiques entre un réseau d'émetteurs et de récepteurs de positions connues. Ces temps de propagation dépendent des conditions de température (au travers de la célérité du son dans l'eau), l'inversion des temps d'arrivée permet de remonter au champ tridimensionnel de température et à son évolution. La rapidité de la propagation des signaux sonores dans l'océan¹ permet de sonoriser des volumes océaniques importants tout en permettant des cadences de mesures élevées.

La TAO a très vite suscité un vif intérêt pour l'océanographie civile par son potentiel à fournir aux océanographes un moyen d'analyse synoptique de la circulation océanique à l'échelle des bassins. Elle a également suscité un vif intérêt pour l'océanographie militaire par sa capacité à fournir des mesures de propagation de signaux sous-marins et des moyens nouveaux d'analyse de l'impact du milieu marin sur la propagation de ces signaux. En cela, la TAO est également devenue un moyen d'investigation de l'impact du milieu sur la propagation sous-marine et, indirectement, un moyen d'améliorer la compréhension de l'impact du milieu sur les performances de sonars de détection sous-marine (DSM). C'est à ce double titre que la TAO a été importée en France au milieu des années quatre-vingt sur une initiative conjointe de l'Institut français pour l'exploitation de la mer (Ifremer), du Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM) et de la Direction générale pour l'armement (DGA).

Près de trente ans se sont écoulés depuis les premières expériences pilotes de tomographie acoustique océanique. Malgré un nombre conséquent de publications, malgré de nombreuses expérimentations probantes, force est de constater qu'il n'existe pas à l'heure actuelle de systèmes opérationnels de tomographie acoustique. C'est ce constat qui nourrit les éléments de réflexion présentés dans cet article. Sous un titre volontairement provocateur, cet article propose une réflexion sur les évolutions possibles du concept de tomographie acoustique. Car finalement, la question mérite d'être posée : la tomographie appartient-elle au passé ou a-t-elle encore un avenir ?

Cet article est articulé comme suit. Dans un premier temps, le concept de tomographie sera rappelé et les raisons de l'échec apparent d'une utilisation opérationnelle seront discutées. La deuxième partie présentera le concept de tomo-

graphie côtière et donnera quelques applications potentielles. Les conclusions et perspectives seront dégagées en fin d'article.

2. LA TOMOGRAPHIE ACOUSTIQUE À L'ÉCHELLE DES BASSINS

2.1 Concept, intérêt et applications

La première expérience de tomographie acoustique remonte à 1826. C'est en effet à cette époque que le physicien suisse J-D. Colladon et le mathématicien français C-F. Sturm placèrent dans le lac Léman deux bateaux à environ 13 kilomètres l'un de l'autre. Un marteau suspendu sous le premier bateau émettait des sons en venant frapper une cloche. Par un levier, le marteau frappant la cloche renversait une bougie sur de la poudre, créant ainsi un signal lumineux concomitant avec le signal sonore. L'observateur sur le deuxième bateau notait la différence de temps entre l'instant où il percevait le signal lumineux et l'instant où il entendait, grâce à un tube trempant dans l'eau, le signal sonore. Cette différence de temps, divisé par la distance, donnait alors une estimation de la célérité du son dans l'eau douce (en l'occurrence 1 435 m/s pour ces premières mesures). Le principe de la tomographie était né (Figure 1, Colladon, 1887).

Dans sa forme "moderne", la tomographie acoustique (Munk & Wunsch, 1979) date de la fin des années 70. La première campagne de validation eu lieu en 1981 (campagne OAT81, Ocean Acoustic Tomography Group, 1982). La tomographie acoustique est une méthode d'observation de l'océan à partir de mesures de propagation acoustique (figure 2). Il s'agit de mesurer des temps de parcours d'un signal acoustique sur des distances connues et d'en déduire le champ de célérité correspondant. De ce champ de célérité peut ensuite se déduire les paramètres physiques de l'océan comme la température ou la densité.

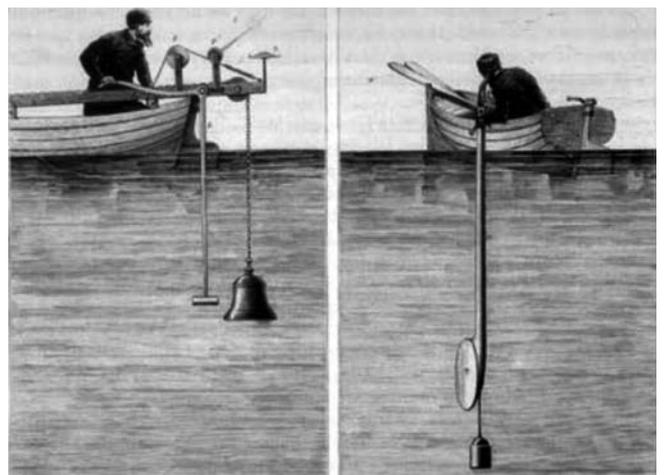


Figure 1 : La première expérience de mesure du son dans l'eau, illustrant le principe de la tomographie acoustique. (source : J.-D. Colladon, *Souvenirs et mémoires*, Genève, 1893, Bibliothèque du musée d'histoire des sciences)

¹ On rappelle que la vitesse du son dans l'eau salée est de l'ordre de 1 500 mètres par seconde, ce qui permet par exemple à un signal sonore de parcourir près de 90 km en 1 minute.

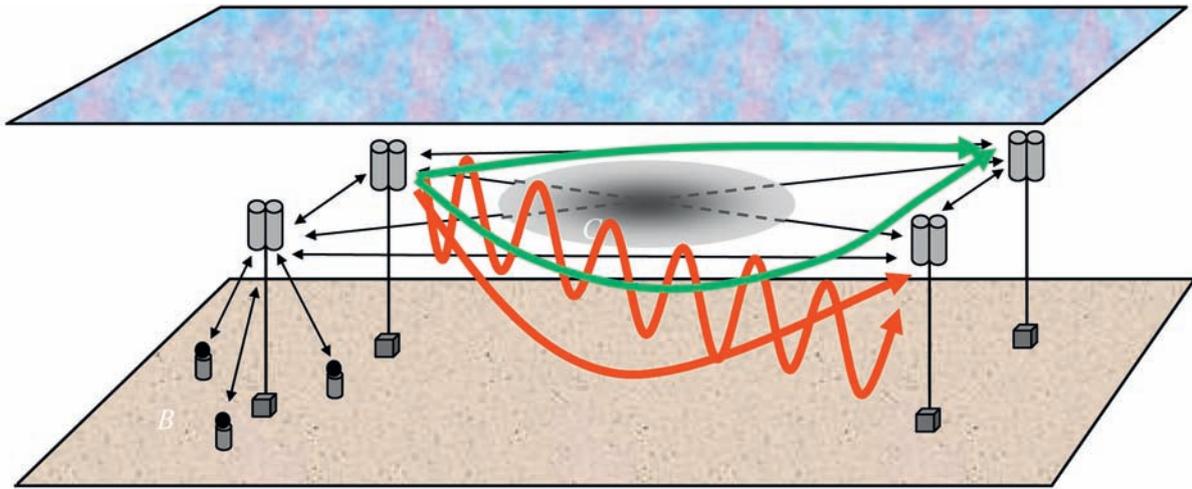


Figure 2 : En haut : principe moderne de la tomographie (adapté de Lurton, 2004). Les sons sont transmis au sein d'un réseau de sources et récepteurs acoustiques de positions connues. L'analyse des temps de parcours des trajectoires acoustiques permet de détecter et caractériser les phénomènes océanographiques. En bas : type d'instrumentation employé lors des campagnes de tomographie de bassin (ERATO, Webb, Corp. et JHAS Ifremer - SHOM)

L'engouement pour la tomographie dans les années 80 et 90 a été principalement dû au fait qu'elle venait palier le manque de techniques d'observation synoptique des bassins océaniques. En effet, si les images satellitales permettaient de couvrir la surface des océans, il n'existait pas de systèmes de mesures sous la mer permettant d'inférer des propriétés intégrales de l'océan sur de grandes distances dans des périodes très courtes. Le son se propageant vite et loin dans l'eau salée, la tomographie devenait un outil prometteur pour permettre l'observation synoptique des océans à moyenne et grande échelle. Nombre d'expérimentations menées partout dans le monde dans les années 90 sont venues confirmer l'intérêt de la tomographie (voir par exemple Dushaw *et al.*, 1993, Munk *et al.*, 1994, Thetis Group, 1994, Stéphan, 1995). Au final, la tomographie s'est montrée très efficace pour l'étude des processus océaniques de petite échelle comme les ondes internes (par exemple Tiemann *et al.*, 2001), de moyenne échelle comme les tourbillons océaniques (p.e. Chester *et al.*, 1994) et de grande échelle comme le réchauffement climatique (p.e. Dushaw *et al.*, 2009).

2.2 Discussion

Malgré ses succès expérimentaux, la tomographie de bassin ne s'est cependant pas imposée comme un moyen de mesure incontournable au sein de la communauté scientifique. Plusieurs raisons peuvent être avancées à ce constat :

- un manque d'intégration aux approches plus conventionnelles de l'océanographie ; la tomographie est une technique qui, par construction, fournit une estimation des célérités du son dans l'océan. S'il est primordial pour l'acousticien ou le sonariste, ce paramètre est peu exploitable directement par l'océanographe physicien qui lui préfère les paramètres physiques comme la température et la densité. Or, si dans des cas simples, on peut relier la célérité à la température et à la salinité, dans le cas général, la dépendance de la célérité envers les paramètres physiques n'est pas triviale et reste une source importante d'imprécision et d'erreur qui peuvent engendrer une certaine défiance vis-à-vis des résultats fournis par un système tomographique. De plus, la communauté des tomo-

graphes a beaucoup misé sur les techniques inverses alors que l'intérêt majeur de la tomographie, son caractère synoptique, aurait plutôt dû orienter les recherches vers l'apport des mesures intégrales à l'assimilation dans les modèles de prévisions océanographiques. Si quelques travaux ont été réalisés en ce sens (par exemple Rémy *et al.*, 2002), il existe dans la littérature un déséquilibre flagrant entre les publications traitant d'inversion, qui se compte par dizaines, et celle traitant d'assimilation, qui sont réduites à quelques unités. Il y a probablement là une orientation que la majorité de la communauté tomographique internationale n'a pas su prendre pour véritablement convaincre et satisfaire au besoin océanographique ;

- le manque de maturité technologique ; si les premières expérimentations ont bien fonctionné avec une instrumentation nouvelle et autonome, les développements instrumentaux visant notamment à augmenter les performances des systèmes (gain en résolution temporelle, augmentation des portées) n'ont pu aboutir. En particulier, il n'a pas émergé dans les années 1990 de technologie mature pour permettre notamment de fournir de l'information en temps réel, indispensable à une exploitation rapide et assimilable dans les modèles de prévisions. Après deux décennies de développements infructueux, la tomographie s'est vu concurrencée par des techniques plus classiques, certes moins synoptiques mais de plus faible coût et mieux adaptées au besoin et à la culture des océanographes comme les flotteurs dérivants et plus récemment, les *gliders* ;
- l'évolution du contexte géostratégique dans la Défense ; la tomographie a beaucoup bénéficié du support des activités de Défense, intéressée non seulement par ses propriétés synoptiques mais aussi par sa capacité à mesurer *in situ* l'impact acoustique des processus océaniques, impact dont l'exploitation tactique en détection sous-marine revêt un intérêt évident. Vers le milieu des années 90, l'intérêt de la Défense s'est porté vers les petits fonds ("from blue waters to green waters"). Supports initiaux essentiels à la tomographie de bassin, les programmes de recherche militaire ont assez subitement migré vers la connaissance des zones côtières et le concept d'évaluation rapide de l'environnement. Cette perte de support en conjonction avec la difficulté de convaincre la communauté civile a été certainement un des facteurs déclencheur du déclin de la recherche en tomographie acoustique océanique ;
- la controverse ; même s'il s'agit d'une raison "scientifiquement incorrecte", les développements en tomographie ont grandement souffert de la polémique déclenchée en 1994 aux USA sur les effets nocifs des émissions sonores à ultra basse fréquence sur les mammifères marins. Un des axes de développement de la technique était en effet l'exploitation de la tomographie pour mesurer le réchauffement climatique à l'échelle des grands bassins. Le programme ATOC² (ATOC consortium, 1998), très ambitieux, permettait pourtant de surmonter les difficultés de la tomographie méso-échelle en se basant sur de l'instrumentation câblée à terre, donc accessible. Il s'intéressait à un

problème océanographique majeur pour lequel le niveau d'information (tendance en température) pouvait raisonnablement être obtenu par simple corrélation avec des données acoustiques (temps de propagation). Enfin, il touchait également un domaine ou l'intérêt militaire progressait (propagation des ondes UBF). Malheureusement, le programme, stoppé suite aux plaintes de biologistes (dont les calculs de puissance acoustique étaient d'ailleurs erronés), a pris beaucoup de retard et ne s'est finalement jamais vraiment remis en route.

En conclusion, la tomographie acoustique océanique n'a clairement pas connu les retombées techniques et scientifiques que ses pionniers lui promettaient. Malgré un projet d'observation de la mer du Labrador piloté par l'Université de Kiel et l'initiative NPAL³ qui garde néanmoins une ambition plus modeste que celle d'ATOC, on ne peut que constater le désintérêt de la majorité de la communauté scientifique pour cette technique sous sa forme originale. Le nombre maintenant restreint de publications dans les journaux internationaux est là pour témoigner du contraste entre les ambitions initiales et les applications actuelles. Pour autant, faut-il déjà enterrer le concept ?

3. DES GRANDS FONDS AUX PETITS FONDS : LA TOMOGRAPHIE CÔTIÈRE

3.1 Concept, intérêt et applications

Comme on l'a précédemment évoqué, l'évolution du contexte géostratégique international dans les années 90, notamment sous l'effet de la chute du mur de Berlin, a rendu prioritaire l'intérêt militaire pour les petits fonds. Cette évolution a eu un effet important sur les développements de la tomographie : le premier, on l'évoque précédemment dans cet article, un basculement des supports financiers vers des études et recherches orientés vers les petits fonds ; le second, le ralliement de l'intérêt d'une nouvelle communauté scientifique. Initialement conçu pour les océanographes, la tomographie est en effet apparue comme un outil intéressant pour les acousticiens et les sonaristes soucieux de prédire au mieux les performances des systèmes et d'anticiper l'impact de l'environnement sur ces performances. D'un concept d'observation synoptique de bassin, l'intérêt opérationnel de la communauté de Défense a basculé vers le concept de système d'évaluation rapide de l'environnement (REA⁴, figure 3), en particulier au travers de son impact acoustique.

Pour répondre à ce nouvel intérêt opérationnel, nombre d'organismes dont en France le SHOM ou à l'OTAN le SACLAN-CEN⁵, ont étudié le potentiel de la tomographie par petits fonds (typiquement des fonds inférieurs à 200 mètres) pour l'optimisation de l'emploi des sonars. Au delà des aspects méthodologiques, le concept lui-même de tomographie a été adapté afin de mieux coller à la réalité opérationnelle et l'emploi des sonars. Comment, à partir de mesures de propagation acoustique sur des systèmes éparses, rapidement déployables, peut-on caractériser la variabilité océanique et géoacoustique d'une zone *a priori* mal connue et dans des délais très courts ?

² Acoustic Thermography of the Ocean Climate

³ North Pacific Acoustic Laboratory

⁴ Rapid Environment Assessment

⁵ Supreme Allied Commander Atlantic CENTER

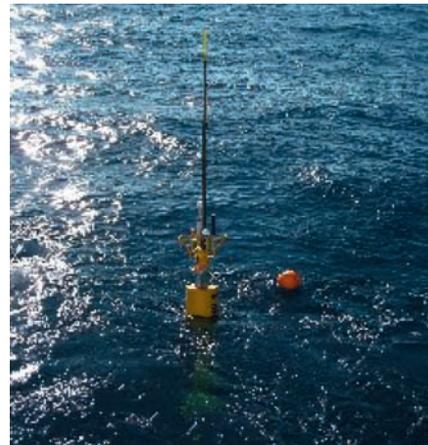
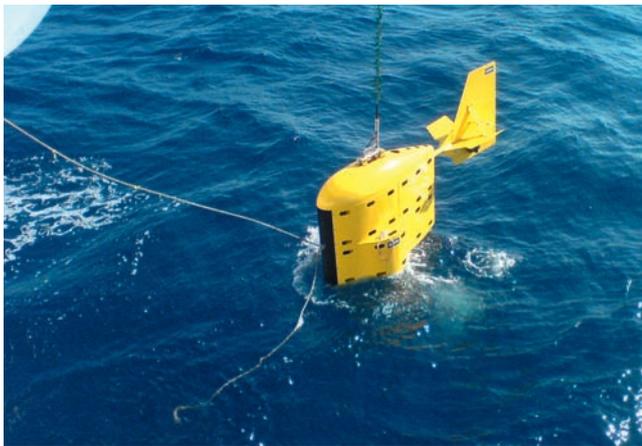
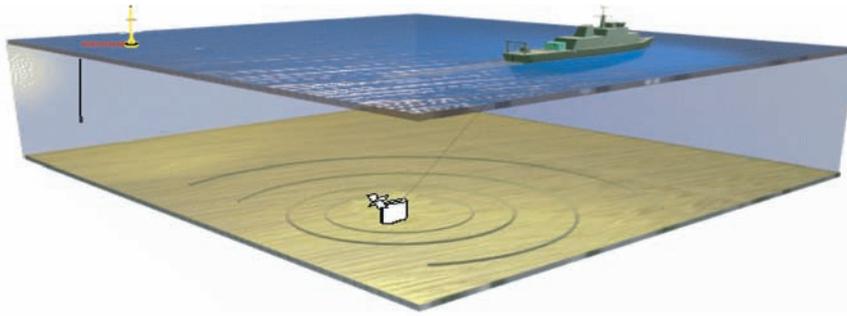


Figure 3 : Un des concepts d'évaluation rapide de l'environnement océano-acoustique. Les signaux émis par une source remorquée sont écoutés par des antennes hydrophoniques dérivantes. Les données sont exploitées à bord pour obtenir une caractérisation géoacoustique des fonds à partir des trajectoires sonores réfléchies sur les interfaces (surface et fond). En haut, illustration du concept, en bas, système STEREO (SHOM)

Le portage du concept de tomographie des bassins vers les plateaux continentaux a entraîné des bouleversements dans l'approche technologique et scientifique du problème.

Du point de vue technologique, les zones d'intérêt étant de dimensions plus réduites que les grands bassins océaniques, il devenait inutile d'abaisser les fréquences pour viser des portées de plusieurs centaines de kilomètres mais plutôt de les remonter pour les mettre en adéquation avec les fréquences classiquement utilisées en détection sous-marine active. L'accessibilité rapide à la mesure plaide également pour le développement d'une instrumentation facilement déployable dont le concept d'emploi est proche des concepts de lutte sous-marine (sources remorquées et antennes hydrophoniques remorquées ou dérivantes).

D'un point de vue scientifique, l'exploitation des mesures nécessitait notamment d'identifier la variabilité du milieu due à la géométrie des capteurs, qui se déplacent en distance et immersion, aux effets de la colonne d'eau (particulièrement la variabilité à forte dynamique - ondes internes notamment -) et aux effets des interfaces (fond et surface de la mer). Les premières campagnes de tomographie côtière ont eu lieu au début des années 1990 (Lynch *et al.*, 1996, Hermand, 1997 & 1999, Stéphan *et al.*, 2000). Les travaux expérimentaux ont montré que la réponse impulsionnelle des canaux petits fonds pour des propagations de l'ordre de la quinzaine de kilomètres est en fait très stable et composée de deux parties : des arrivées rapides correspondant aux trajets directs entre la source et le récepteur et des arrivées plus tardives

correspondant aux réflexions aux interfaces. Par ailleurs, les modèles de propagation par modes et par rayons permettaient de bien prédire les arrivées acoustiques. Les techniques d'inversion de signaux large bande ont permis de montrer la faisabilité de la tomographie acoustique côtière tant pour obtenir les paramètres géoacoustiques des fonds marins que pour étudier la variabilité de la colonne d'eau.

3.2 Discussion

Les développements pilotes conduits à la fin des années 1990 et au début des années 2000 ont démontré la faisabilité et l'intérêt de la tomographie côtière, tout comme, il y a une quinzaine d'années, le même type de développement laissait présager d'une utilisation opérationnelle de la tomographie hauturière. Le contexte scientifique et technique semble cependant différent et de nature à permettre l'éclosion de systèmes opérationnels.

3.2.1 Des enjeux scientifiques, économiques et sociétaux importants

De manière générale, les enjeux liés à la connaissance et l'observation des zones côtières apparaissent de plus en plus importants et suscitent une demande plus forte amplifiée par l'exercice de responsabilités nationales ou internationales des états côtiers dans de multiples domaines (soutien aux activités économiques, gestion des ressources, développement durable, surveillance biologique et sanitaire, sécurité maritime,...). Paradoxalement, la connaissance des

zones côtières est souvent moins bien maîtrisée que celle des océans profonds. Par rapport à la tomographie grands fonds, dont on a vu qu'elle était finalement d'un intérêt fort mais dans un périmètre restreint, il existe un besoin plus affirmé d'informations sur des zones côtières. Ce qu'il est convenu de nommer le "manque abyssal de connaissance par petits fonds" crée une aspiration pour les techniques d'observation du milieu en général et les techniques acoustiques en particulier. Cette aspiration se traduit par le besoin non seulement de la communauté scientifique mais aussi de l'ensemble des usagers de la mer (acteurs publics et privés, décideurs et exploitants,...) de disposer de données et d'indicateurs permettant de surveiller, interpréter, comprendre et caractériser les milieux littoraux et côtiers.

3.2.2 Une technologie plus accessible

La tomographie côtière est dans son concept d'emploi probablement plus accessible. La proximité des côtes permet notamment d'envisager des concepts de réseaux d'écoute câblés à terre ou à minima, de réseaux de communication en temps réel. Contrairement à l'instrumentation grands fonds, qui avait recours à des traitements *in situ* dédiés au problème d'inversion de temps de parcours, les technologies existantes de stockage d'information alliées à des transferts suffisamment performants pourraient permettre de valoriser les données acoustiques recueillies dans toute leur diversité. En particulier, l'exploitation de toutes les bandes d'écoute hydrophonique disponibles (de quelques hertz à quelques dizaines de kilohertz) et les traitements déportés pourront favoriser une très large exploitation scientifique et ainsi mieux répondre au besoin des utilisateurs.

3.2.3 Un spectre large d'applications

En corollaire à cette technologie plus accessible, le fait de disposer de jeu de données plus riches et accessibles en temps réel permet d'envisager des applications multiples et pluridisciplinaires. Un concept de tomographie côtière reposant en amont sur un réseau d'observations à base de capteurs large bande permet en effet d'envisager des applications :

- pour l'océanographie côtière, par l'assimilation de données dans les modèles de circulation océanique,

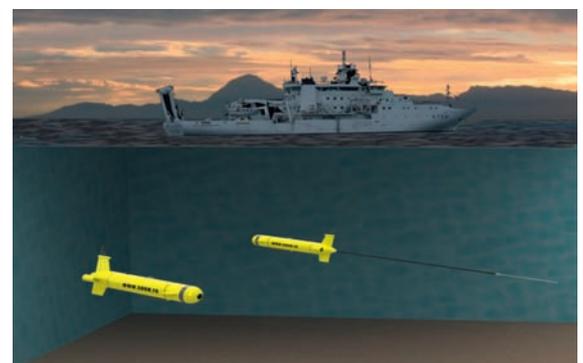
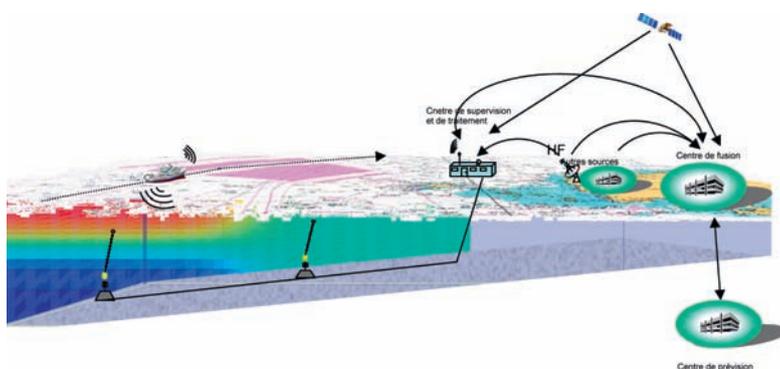
- pour l'étude des fonds marins, notamment dans sa composante géoacoustique,
- pour la biologie marine, par du monitoring acoustique de la faune et de la flore sous-marine et de leur comportement et évolution,
- pour la surveillance et la régulation des activités anthropiques et les études de leur impact sur les écosystèmes.

Des exemples illustrant toute la diversité des applications possibles sont traités dans d'autres articles de ces *Annales Hydrographiques* (Hermand, 2010, Carrière *et al.*, 2010) ou ont fait l'objet de présentations orales au séminaire SERE-NADE. Nous ne les reprendrons pas ici.

Il est également à noter que contrairement à la tomographie de bassin, le concept de TAO côtière peut se décliner dans des formes discrètes (Gervaise *et al.*, 2007, Stéphan *et al.*, 2009) par utilisation de signaux émis à faible rapport signal à bruit ou par utilisation de signaux d'opportunité. Au prix certes d'une augmentation de la complexité scientifique des traitements et d'une ambition plus modeste en terme de performances, le recours à des concepts non intrusifs offre une réponse plus large et plus adaptée à l'observation de zones côtières (figure 4), dont l'accès peut être plus contraint pour de multiples raisons (sécurité de la navigation, interférence avec des activités navales, protection de l'environnement, ...). C'est également un intérêt tactique important dans le domaine des applications militaires où l'emploi de systèmes déportés de type AUV pour la caractérisation rapide du milieu fait l'objet d'études préliminaires (Billant *et al.*, 2009, figure 4).

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le concept de tomographie acoustique de bassin, né il y a une trentaine d'années, a suscité un engouement très fort à la fin du vingtième siècle. Cet engouement est nettement retombé depuis et le concept n'a pas débouché sur de réelles applications opérationnelles. L'intérêt très fort suscité depuis une dizaine d'années pour les zones côtières, que ce soit pour des applications civiles ou militaires, a fait émerger de nouveaux concepts comme l'évaluation rapide de l'environnement



(source J. Maguer, SHOM/Atelier mouillage)

Figure 4 : Deux concepts envisageables pour la tomographie côtière. À gauche, observatoire acoustique au large d'Ouessant exploitant le bruit généré par le trafic maritime (Stéphan *et al.*, 2009). À droite, vue d'artiste de deux AUV de tomographie pour l'évaluation rapide de l'environnement côtier (Billant *et al.*, 2009).

ronnement et la tomographie côtière, active et discrète. Quels sont les évolutions prévisibles à court et moyen termes de ces différents concepts ?

La tomographie acoustique océanique : technique du passé ?

La tomographie hauturière a demandé un investissement important par le passé. Même si son pendant en surface, l'observation satellitale, demande des moyens d'un ordre de grandeur bien plus important, la tomographie de bassin n'a pas permis de fournir à la communauté scientifique l'équivalent de ce que peut fournir l'imagerie par satellites. Au final, une instrumentation de tomographie ciblée sur l'estimation de paramètres moyens, certes très intéressante pour la modélisation océanographique ou la compréhension du climat, nécessiterait un investissement lourd en terme de technologie pour un apport finalement limité et dédié. Il semble que la communauté scientifique pour l'observation des océans, ne soit plus à la recherche de moyens de mesures intégraux et donc peu résolus mais plutôt à la recherche de la multiplication de systèmes ponctuels, dynamiques et de faible coût. En dépit de certaines initiatives toujours en cours, l'intérêt pour les techniques de tomographie hauturière semble retombé et il ne paraît pas envisageable que des développements nouveaux et ambitieux ne voient le jour à court et moyen termes.

La tomographie acoustique océanique : technique de l'avenir ?

Le contexte scientifique paraît favorable pour qu'éclosent des applications opérationnelles de la tomographie côtière. Par rapport à son "aînée", la tomographie côtière nécessite des investissements technologiques moins importants, notamment pour l'aspect réception pour lequel des systèmes, certes encore autonomes, existent à bas prix. A contrario, la richesse de la donnée acoustique par petits fonds permet d'envisager des applications à large spectre, fortement interdisciplinaires et apportant des informations très complémentaires des systèmes de mesures conventionnels. De plus, la tomographie côtière peut bénéficier d'une demande plus forte en terme de besoin et profiter de synergies comme notamment des développements en cours sur les observatoires côtiers (comme par exemple MeDON⁴) ou l'océanographie côtière (SNOCO⁵).

Afin de franchir le cap de l'opérationnalité, les développements à court et moyen termes de la tomographie côtière devront s'articuler autour de deux axes :

- la mise au point des réseaux d'écoute large bande multi-usages afin de profiter de gains logistiques et technologiques nets d'une forte valeur ajoutée scientifique ("une donnée, de multiples informations") ;
- le développement de nouveaux outils scientifiques ; un effort de recherche est à conduire en particulier dans le domaine des techniques de traitement du signal et d'inversion en tomographie discrète, puisque le recours à des signaux à faible rapport signal à bruit et non contrôlés rend plus complexe l'approche tomographique ; un effort sera également à mener pour transformer les données acoustiques en informations utiles à l'ensemble des utilisateurs ;

cela se traduira en particulier par la définition et la quantification d'indicateurs biologiques à partir de données acoustiques.

BIBLIOGRAPHIE

ATOC Consortium (1998): "Ocean climate change: Comparison of acoustic tomography, satellite altimetry, and modeling". *Science* (281, p. 1327-1332).

BILLAND P., DEMOULIN X. et STÉPHAN Y. (2009) : "Etude relative à l'utilisation d'engins sous-marins autonomes pour la tomographie acoustique océanique". *Rapport d'étude de marché 08MF0016*, Service hydrographique et océanographique de la marine.

CHESTER D., MALANOTTE-RIZZOLI P., LYNCH J. and WUNSCH C. (1994): "The eddy radiation field of the Gulf stream as measured by ocean acoustic tomography". *Geophysical Research Letters* (vol. 21, n° 3, p 181-184).

COLLADON J-D. (1887). Mémoire sur la compression des liquides et de la vitesse des sons dans l'eau, Genève.

DUSHAW B. D., WORCESTER P. F., CORNUELLE B. D. and HOWE B. M. (1993): "Variability of heat content in the central North-Pacific in summer 1987 determined from long-range acoustic transmissions". *Journal of Physical Oceanography* (23, p. 2650-2666).

DUSHAW B. D., WORCESTER P. F., MUNK W.H., SPINDEL R. C., MERCER J. A., HOWE B. M, Metzger K. Jr, BIRDSALL T.G., ANDREW R.K., DZIECIUCH M.A., CORNUELLE B. D. and MENEMENLIS (2009): "A decade of acoustic thermometry in the North Pacific Ocean". *Journal of Geophysical Research* (114, C07021).

GERVAISE C., VALLEZ S., STÉPHAN Y., SIMARD Y (2007): "Passive acoustic tomography: an efficient way to reduce acoustic emission in tomographic process – review, new concept & applications using marine mammals vocalises". *Journal of the Marine Biological Association of United Kingdom* (87, 5-10).

HERMAND J-P. (1997): " The application of broad-band acoustic tomography to the monitoring of the shallow water environment : Validation and trends (Invited paper)," in *Operational Oceanography. The Challenge for European Co-Operation. Proceedings of the First International Conference on EuroGOOS* (J. H. Stel, H. W. A. Behrens, J. C. Borst, L. I. Droppert, and J. van der Meulen, eds.), vol. 62 of *Oceanography*, (Amsterdam), pp. 568-575, EuroGOOS, Elsevier, Oct. 1997.

HERMAND J-P. (1999): "Broad-band geoacoustic inversion in shallow water from waveguide impulse response measurements on a single hydrophone: theory and experimental results". *IEEE Journal of Oceanic Engineering* (24 (1), 41-66).

⁴ Marine e-Data Observatory Network, <http://medon.info/>

⁵ Service National d'Océanographie Côtière

HERMAND J-P. (2004): "Acoustic remote sensing of photosynthetic activity in sea grass beds" in *Scaling Methods in Aquatic Ecology. Measurement, Analysis, Simulation* (L. Seuront and P. G. Strutton, eds., chapter 5, pp. 65–96, Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, 2004).

LURTON X. (2004) : "Acoustique sous-marine: présentation et applications" (Ifremer, 110 p).

LYNCH J. F., JIN G., PAWLOWICZ R., RAY D., PLUEDDEMANN A., CHIU C. S. MILLER J. H. BOURKE R. H. PARSONS R., MUENCH R. (1996): "Acoustic travel-time perturbations due to shallow-water internal waves and internal tides in the Barents Sea Polar Front: Theory and experiment". *Journal of the Acoustical Society of America* (volume 99, Issue 2, pp. 803-821).

MUNK W., WUNSCH C. (1979): "Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring". *Deep-Sea Research* (26A, p. 123-161).

MUNK W., SPINDEL R. and BAGGEROE, A. (1994): "The Heard Island feasibility test". *Journal of the Acoustical Society of America*. (volume 96, Issue 4, pp. 2330-2342, October 1994).

Ocean Acoustic Tomography Group (1982): "A demonstration of ocean acoustic tomography". *Nature* (299, p. 121-125).

RÉMY E., GAILLARD F. and VERRON J. (2002): "Variational assimilation of ocean tomographic data: Twin experiments in a quasi-geostrophic model". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* (vol 128(A), n° 583, p. 1739-1758).

STÉPHAN Y., EVENOU F., MARTIN-LAUZER F-R. (1995), GASTOM90: "Acoustic tomography in the Bay of Biscay". *IEEE OCEANS'95* (1, p 55-59).

STÉPHAN Y., DEMOULIN X., FOLÉGOT T., JESUS S, PORTER M., COELHO E. (2000): "Acoustical effects of internal tides on shallow water propagation: An overview of the INTIMATE96 experiment" in *Experimental Acoustics Inversion Methods for Exploration of the Shallow Water Environment* (Caiti, Hermand, Jesus and Porter, eds., KLUWER, 19-38).

STÉPHAN Y., HERMAND J-P., CARRIÈRE O. (2009): "Operational feasibility of an acoustic passive monitoring of the Ushant front". *Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results, Nafplion, Greece, 21-26*.

Thetis Group (1994): "Open-ocean deep convection explored in the Mediterranean". *EOS Transactions* (vol. 75, n° 19, p. 217-221).

TIEMANN C. O., WORCESTER P. F. and CORNUELLE B. D. (2001): "Acoustic remote sensing of internal solitary waves and internal tides in the Strait of Gibraltar". *Journal of the Acoustical Society of America*. (110, p. 798-811).

WORCESTER P. F., LYNCH J. F., MORAWITZ W. M. L., PAWLOWICZ R., SUTTON R., CORNUELLE B. D., JOHANNESSEN O. M., MUNK W. H. OWENS, W. B., SHUCHMAN R. and SPINDEL R. C. (1993): "Evolution of the large-scale temperature field in the Greenland Sea during 1988-1989 from tomographic measurements". *Geophysical Research Letters* (20, p. 2211-2214).

ASSIMILATION DE DONNÉES ACOUSTIQUES : SUIVI DU FRONT D'OUessant

par Olivier Carrière ⁽¹⁾, Jean-Pierre Hermand ⁽¹⁾ et Yann Stéphan ⁽²⁾

RÉSUMÉ

La prédiction et la modélisation des océans nécessitent d'importantes mesures satellites et hydrographiques pour fournir des résultats précis et valides, via des méthodes d'assimilation. En environnement côtier, cette tâche est rendue plus complexe à cause du couplage fort entre les variables d'état et le forçage, le manque de données et les fréquentes ruptures de modèle. En outre, dans la région d'Ouessant, la couverture nuageuse rend fréquemment impossible l'utilisation des mesures satellites. La tomographie acoustique peut fournir des mesures complémentaires, dans des échelles temporelles et spatiales utiles pour la modélisation régionale. Dans ce contexte, le présent travail développe une approche d'assimilation de données acoustiques, basée sur les filtres de Kalman utilisant un modèle de structure pour paramétrer le front thermique d'Ouessant. Les résultats de simulation montrent qu'une telle approche pourrait permettre de suivre acoustiquement la position du front, lorsqu'il est présent.

ABSTRACT

Ocean modeling and forecasting require significant hydrographic and satellite measurements to provide accurate and valid results through assimilation methods. In coastal environment, this task is made more complex because of the strong coupling between state variables and forcing, the lack of data and the frequent model break. In addition, in the region of Ushant, cloud cover often makes it impossible to use satellite measurements. Acoustic tomography can provide complementary measures in time and space scales relevant to regional modeling. In this context, this paper develops an approach to acoustic data assimilation based on Kalman filters using a feature model to parameterize the thermal front of Ushant. The simulation results show that this approach could acoustically track the front position, when present.

⁽¹⁾ Environmental Hydroacoustics Lab., OPERA-Acoustics Dept. Université libre de Bruxelles (U.L.B.), avenue Franklin D. Roosevelt, 50 - CP 194/05 - 1050 Brussels, Belgium. (Email : ocarrier.jhermand@ulb.ac.be)

⁽²⁾ SHOM, 13 rue du Chatellier, CS92803, 29228 Brest Cedex 2, France. (Email : yann.stephan@shom.fr)

1. INTRODUCTION

L'étude et la surveillance des zones côtières sont essentielles dans la compréhension et la gestion des environnements marins, du point de vue environnemental comme du point de vue économique. Le rail d'Ouessant constitue l'un des couloirs de navigation les plus empruntés au monde, avec une moyenne de cent cinquante bateaux par jour. Dans cette zone se développe chaque année, entre avril et octobre, un front thermique qui affecte l'activité biologique et la pêche. Etant donnée la couverture nuageuse régulière dans cette région, la surveillance de ce front nécessite des moyens de mesure alternatifs à l'observation satellitale. Ce travail propose une méthode de suivi basée sur des techniques de tomographie acoustique, permettant de surveiller l'évolution de la position du front au cours du temps.

Le front d'Ouessant se développe à cause du fort mélange de marée qui opère à proximité de la côte. Il oppose ainsi les eaux homogènes côtières aux eaux stratifiées au large. Sa dynamique est élevée, le front pouvant se déplacer de plusieurs dizaines de kilomètres et générant de nombreux méandres. La différence de température de surface est typiquement de l'ordre de 3 - 4° C. La présence d'un front, de même que le relief côtier, affecte fortement la propagation acoustique [1] - [3]. Le front étant défini par les deux profils de température qui s'opposent, ainsi que par l'étendue de la zone de transition entre les deux régions, il semble opportun d'étudier la possibilité d'inverser des mesures de propagation acoustique au travers du front pour en estimer les paramètres structuraux.

L'assimilation de mesures acoustiques dans des modèles océaniques fut suggérée dans les années 90 (voir, par exemple, [4] ou [5]). Depuis, de nombreux travaux étudient cette problématique [6] - [9], mais principalement avec des méthodes de tomographie basées sur les temps de parcours. Malheureusement, de telles grandeurs ne sont pas toujours observables dans les environnements de faible profondeur, pour des raisons de résolution et d'identification des arrivées. Pour palier cet inconvénient, il est possible de développer des méthodes d'assimilation de mesures plein champ, utilisant des filtres de Kalman non linéaires [10]. Utilisant la même approche, ce travail s'oriente vers le suivi de structures océaniques spécifiques (ici, un front thermique). Pour ce faire, un modèle de structure [3] constitue le schéma du paramétrage de l'environnement, en construisant le front à partir d'équations mathématiques simples.

Le papier s'organise de la façon suivante. La section 2 présente l'approche utilisée dans ce travail, avec une brève description du modèle de structure, suivie par la définition du modèle espace - état pour l'estimation séquentielle de l'état du front thermique par tomographie acoustique. La section 3 présente ensuite un résultat de suivi séquentiel, avec deux algorithmes de filtrage de Kalman non linéaires. La section 4 conclut le papier.

2. APPROCHE

La tomographie acoustique, ou plus généralement, le problème inverse en acoustique sous-marine peut-être reformulé comme un problème d'assimilation de données [11]. Dans

le cas présent, cette reformulation permet d'introduire naturellement la notion de suivi dans le temps de l'évolution des paramètres environnementaux. Différentes catégories de méthodes d'assimilation de données existent, et le choix de l'une d'elles dépend généralement de l'application. Après avoir défini un modèle espace - état (voir ci-dessous), l'implémentation d'un filtre de Kalman s'avère relativement simple, et les récents développements dans le filtrage de modèle non linéaire permettent d'envisager son application pour la tomographie acoustique basée sur des mesures plein champs.

2.1 Modèle de structure

La première étape dans un problème inverse est la définition du modèle décrivant le système que l'on veut inverser. Des modèles numériques du front d'Ouessant existent (avec ROMS [12], MARS [13] ou HYCOM [14]). Cependant, l'assimilation de données acoustiques au sein de modèles océanographiques peut s'avérer complexe, notamment à cause des différences de grille de discrétisation. Dans ce travail, le modèle de front est formulé à partir de fonctions mathématiques simples, permettant d'isoler les processus liés au front qui ont un impact fort sur la propagation acoustique. Ce modèle de structure (*feature model*, en anglais) s'inspire directement de [3], et décrit le champ de température $F(r,z)$ dans une tranche verticale de l'environnement, au travers du front :

$$\text{eq 1} \quad F(r, z) = F_c(z) + \frac{F_h(z) - F_c(z)}{1 + e^{-2(r-r_0)/L}},$$

où $F_c(z)$ et $F_h(z)$ sont respectivement les profils de température dans la partie froide (homogène, côtière) et la partie chaude (stratifiée, au large), L est le quart de longueur du front, et r_0 la position centrale du front, définie par le maximum du gradient de température. La figure 1 illustre un champ de température typique obtenu avec ce modèle, avec un fond plat à 130 m de profondeur. Dans ce travail, les profils de température sont paramétrés par trois EOF (*Empirical Orthogonal Function*, voir [15]), pour le profil chaud, et la valeur de l'isotherme, pour le profil froid. Le front est donc décrit par six paramètres structuraux.

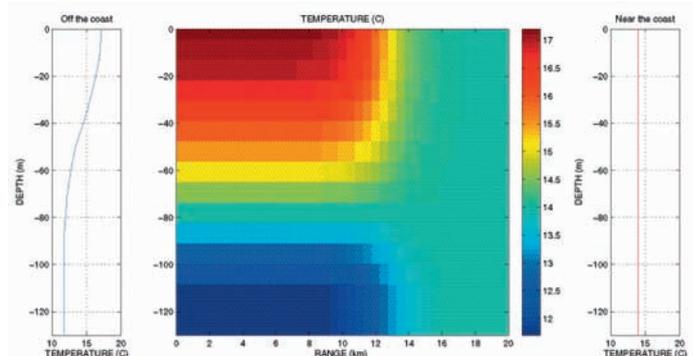


Figure 1 : Exemple de champ de température (°C) construit à l'aide du modèle de structure. La position centrale est de 10 km et le quart de longueur L de 2 km.

2.2 Modèle espace-temps et filtrage de Kalman

Les paramètres du front constituent le vecteur d'état x , auquel on associe un modèle dynamique A décrivant l'évolution de ce vecteur au cours du temps. Considérant des mesures peu espacées dans le temps, on suppose ici un modèle de marche aléatoire pour les paramètres de l'environnement, caractérisée par un terme de bruit gaussien w de moyenne nulle et de covariance R_{ww} :

$$\text{eq 1 } x(t_k) = A[x(t_{k-1})] + w(t_k) \quad \text{[transition].}$$

A chaque état de l'environnement est associé un vecteur de mesure y , lié au vecteur d'état par le modèle de mesure C , auquel on ajoute un terme de bruit gaussien v , englobant bruit additif sur les mesures et incertitudes de modèle (qui peuvent être introduites à la fois par le modèle de structure et par le modèle de propagation acoustique), de moyenne nulle et de covariance R_{vv} :

$$\text{eq 2 } y(t_k) = C[x(t_k)] + v(t_k) \quad \text{[mesure].}$$

Ce modèle espace - état défini, on peut facilement appliquer un filtre de Kalman pour exprimer la meilleure estimation (au sens de la variance minimale) du vecteur d'état X pour des mesures données y , au temps t_k , que l'on peut écrire formellement comme¹ :

$$\text{eq 3 } \hat{x}(t_k) = A\hat{x}(t_{k-1}) + K(t_k)[y(t_k) - CA\hat{x}(t_{k-1})],$$

où le gain de Kalman $K(t_k)$ dépend des matrices de covariance des vecteurs x et y et de l'estimation de l'incertitude associée à x . La figure 2 illustre la forme séquentielle du filtrage, et ses différents modules. Plus de détails sur les filtres de Kalman peuvent être trouvés, par exemple, dans [16].

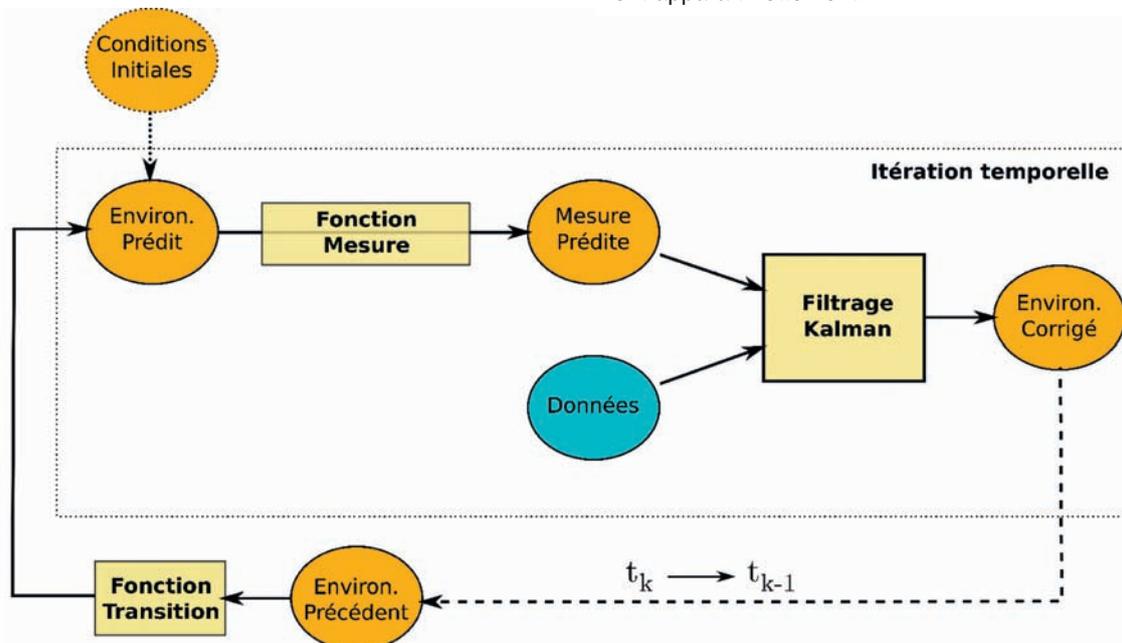


Figure 2 : Schéma d'une séquence de filtrage de Kalman. L'algorithme opère en deux étapes, la première de prédiction, la seconde de correction, où intervient le gain qui pondère la différence entre les données et la prédiction de celles-ci.

¹Cette forme matricielle n'a de sens que dans le cas d'un modèle linéaire ou linéarisé (*Extended Kalman filter*, ou EKF). Les filtres de Kalman non linéaires plus avancés, tels que l'*Unscented Kalman filter* (UKF) ou l'*Ensemble Kalman filter* (EnKF), utilisent toutefois un schéma similaire, mais faisant intervenir les fonctions de mesure et de transition non linéaires sur des ensembles statistiques de vecteurs.

3. RÉSULTATS

Afin de tester le potentiel du suivi séquentiel de la position du front par tomographie acoustique, un scénario environnemental réaliste est obtenu à partir d'une simulation HYCOM de la mer d'Iroise. Pour le modèle acoustique, une source est placée au large, à 5 m de profondeur pour représenter la profondeur typique du centre acoustique du bruit d'un bateau et une antenne de 16 hydrophones est considérée à proximité de la côte, entre 30 et 60 mètres de profondeur. Les trois fréquences utilisées, à savoir 200 Hz, 400 Hz et 600 Hz, sont représentatives des lignes spectrales que l'on peut trouver dans le spectre de bruit de bateaux. Seule l'amplitude du champ de pression acoustique est assimilée au sein du filtre. La distance entre source et récepteurs est d'approximativement 26 km. La figure 3 illustre le positionnement de la radiale acoustique dans la zone d'Ouessant.

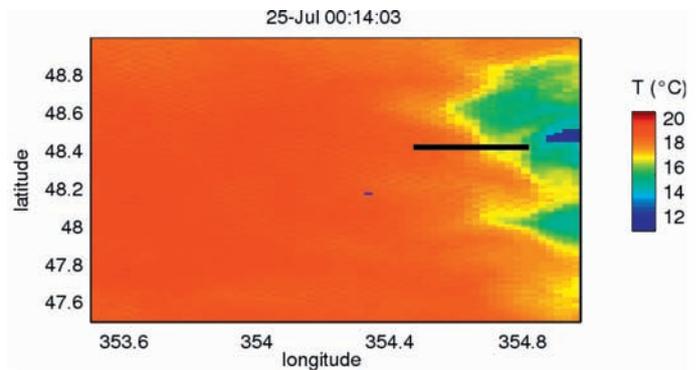


Figure 3 : Positionnement de la radiale tomographique dans la zone d'Ouessant. La figure montre un exemple de température de surface prédite par le modèle HYCOM, où le front apparaît nettement.

Les paramètres estimés sont ceux du modèle de structure, soit la position du front, le quart de longueur du front et trois coefficients EOF pour le profil chaud (au large) et une valeur de température pour le profil homogène (à la côte). La base d'EOF utilisée pour le paramétrage du profil stratifié est calculée à partir des sorties d'HYCOM, pour la période du scénario. La bathymétrie et les propriétés du fond sont ici connues.

La figure 4 montre l'évolution de l'estimation des paramètres du front durant 24 heures, avec l'assimilation de mesures acoustiques toutes les 15 minutes, avec deux extensions non linéaires différentes de l'algorithme de Kalman, l'EKF et l'EnKF. Bien que le scénario original ne soit pas parfaitement caractérisé par une marche aléatoire gaussienne de moyenne nulle, les deux filtres testés suivent les paramètres avec une précision satisfaisante. Pour les paramètres de température, le filtre d'en-

semble (EnKF) donne des résultats les plus précis, notamment pour le profil froid.

Les performances des filtres peuvent être traduites en terme d'erreur RMS² sur le champ de vitesse reconstruit à partir de l'estimation des paramètres (la salinité est considérée comme connue). La figure 5 illustre l'évolution de cette erreur au cours du temps, et confirme la supériorité du filtre EnKF sur l'EKF. En outre, la prédiction des incertitudes associées aux estimations, par l'EKF, n'est pas compatible statistiquement avec les erreurs réelles d'estimation, alors que l'EnKF prédit des incertitudes qui respectent les statistiques d'erreur (non montré). Il est important de noter que la supériorité du filtre d'ensemble est obtenue pour des grands ensembles stochastiques de réalisations au sein de l'algorithme, ce qui engendre un coup de calcul nettement plus élevé que pour l'EKF.

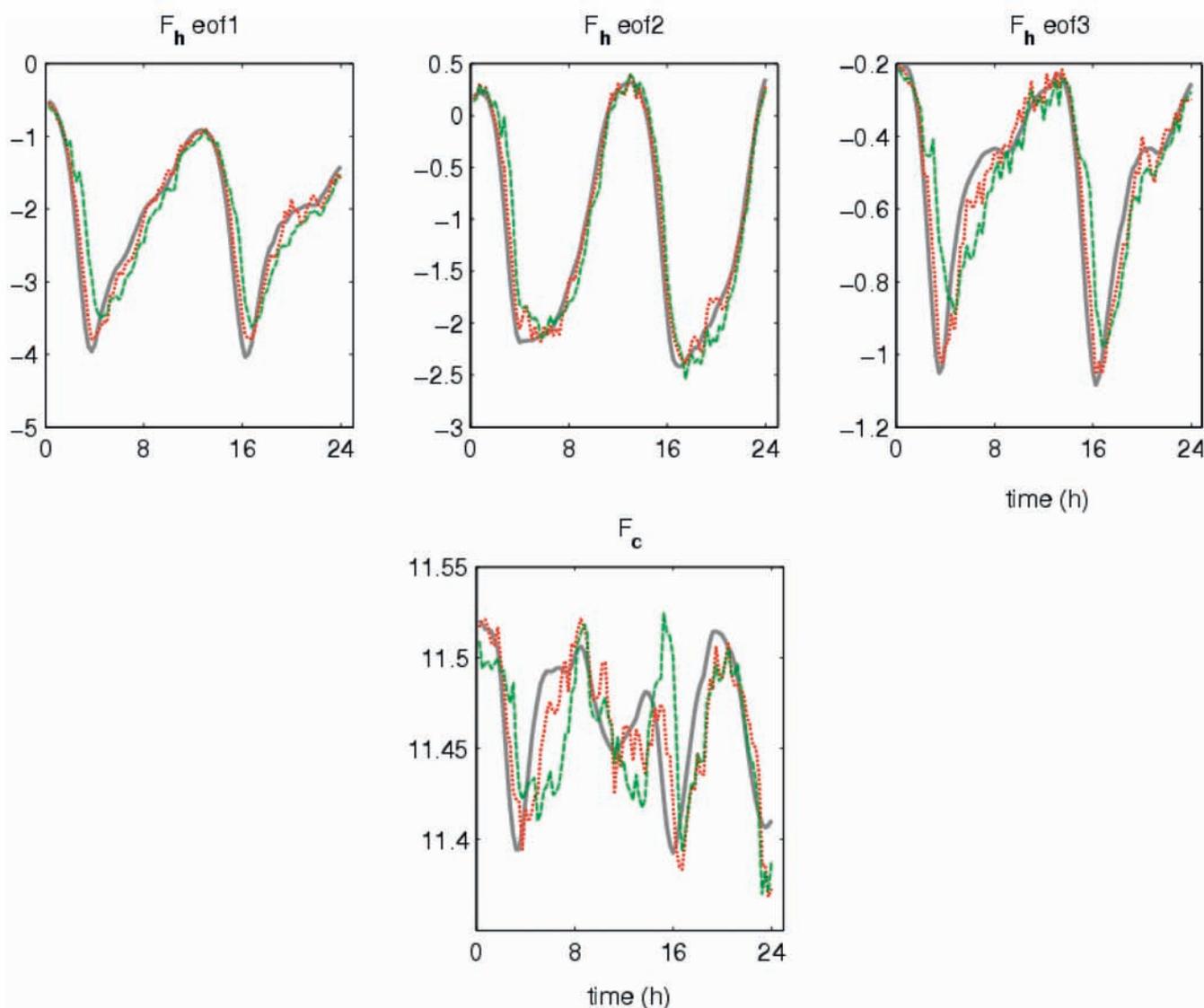


Figure 4 : Filtrage séquentiel des paramètres structuraux du front, durant 24 heures, avec une assimilation du champ acoustique toutes les 15 minutes, avec un EnKF (trait pointillé rouge) et un EKF (trait discontinu vert). La valeur exacte des paramètres est tracée en gris continu.

² Root Mean Square (erreur quadratique moyenne)

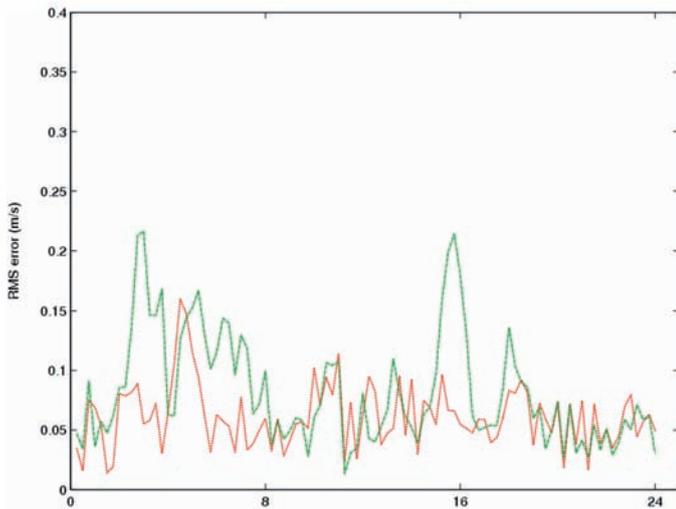


Figure 5 : Evolution de l'erreur RMS sur le champ de vitesse, durant 24 heures. Dans le cas présent d'une expérience jumelle, l'erreur minimale théorique est nulle. L'EnKF (trait pointillé rouge) montre des valeurs inférieures à l'EKF (trait discontinu vert) sur 66 % des itérations.

4. CONCLUSION

Dans ce papier, l'utilisation d'un modèle de structure pour le suivi du front d'Ouessant par tomographie acoustique est investiguée. Un filtre de Kalman est appliqué aux mesures multifréquences sur une antenne d'hydrophones, pour estimer séquentiellement l'évolution des paramètres structuraux du front. La position de la source est représentative de la profondeur de source de bruit de bateaux. Les simulations montrent que la tomographie acoustique peut fournir un outil de mesure complémentaire aux outils existants (mesures satellites, mesures *in situ*), en fournissant une estimation du champ de température à deux dimensions entre la source et l'antenne d'hydrophones.

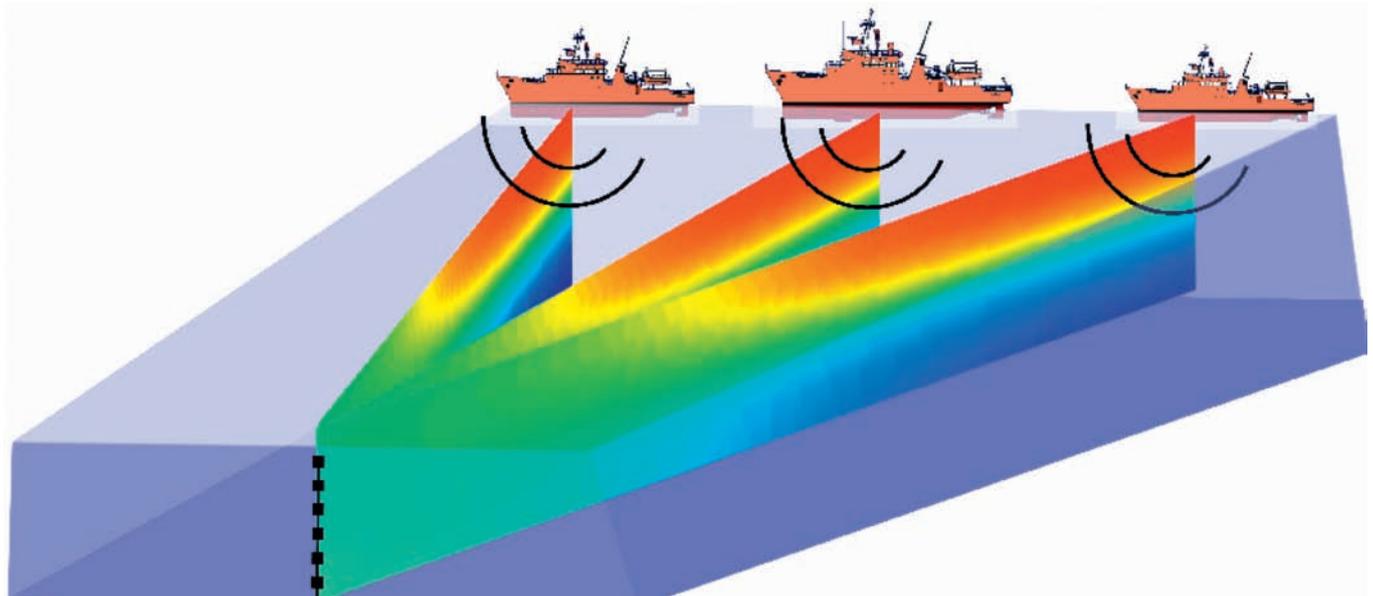


Figure 6 : Utilisation du trafic maritime dans la zone d'Ouessant pour l'estimation de la température dans des tranches verticales de l'environnement, définies par la position du bateau, au large, et l'antenne d'hydrophones, placée à proximité de la côte.

La zone d'Ouessant est un lieu de trafic maritime intense, avec une moyenne de 150 bateaux par jour, sur des rails délimités et contrôlés. La tomographie acoustique et l'inversion géoacoustique passives ont déjà fait l'objet de nombreux travaux (voir, par exemple, [17] – [19]). On peut dès lors concevoir le déploiement d'un réseau de tomographie passive dans cette zone, afin d'estimer l'état du front à chaque fois qu'un bateau fournit des signaux utilisables pour l'inversion (Figure 6), en combinant des informations sur le trafic, que l'on peut obtenir par exemple par AIS (*Automatic Identification System*) et une base de données sur les caractéristiques acoustiques des types de bateaux qui empruntent le rail. Ce principe est actuellement examiné en détail, avec des enregistrements réalisés à proximité du rail d'Ouessant qui permettront d'étudier quels bruits de bateaux peuvent être utilisés pour l'inversion.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. D. HEATHERSHAW, C. E. STRETCH and S. J. MACKELL: "Coupled oceanacoustic model studies of sound propagation through a front". *J. Acoust. Soc. Amer.* (vol. 89, no. 1, pp. 145–155, 1991). [Online] Available: <http://link.aip.org/link/?JAS/89/145/1>.
- [2] G. JIN, J. F. LYNCH, C. S. CHIU and J. H. MILLER: "A theoretical and simulation study of acoustic normal mode coupling effects due to the Barents sea polar front, with applications to acoustic tomography and matched-field processing". *J. Acoust. Soc. Amer.* (vol. 100, no. 1, pp. 193–205, 1996).
- [3] J. SMALL, L. SHACKLEFORD and G. PAVEY: "Ocean feature models - their use and effectiveness in ocean-acoustic forecasting". *Annales Geophysicae* (vol. 15, pp. 101–112, 1997).
- [4] W. MUNK, P. WORCESTER and C. WUNSCH. *Ocean acoustic tomography* (C. U. Press, Ed. Cambridge, 1995).

- [5] I. FUKUMORI and P. MELANOTTE-RIZZOLI: "An approximate Kalman filter for ocean data assimilation; an example with an idealized Gulf Stream model". *J. Geophys. Res.* (vol. 100, no. C4, pp. 6777–6793, 1995).
- [6] J. H. PARK and A. KANEKO: "Assimilation of coastal acoustic tomography data into a barotropic ocean model". *Geophys. Res. Lett.* (vol. 27, no. 20, pp. 3373–3376, 2000).
- [7] E. RÉMY, F. GAILLARD and J. VERRON: "Variational assimilation of ocean tomographic data: Twin experiments in a quasi-geostrophic model". *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* (vol. 128, no. 583, pp. 1739–1758, 2002).
- [8] P. LERMUSIAUX and C. S. CHIU: "Four-dimensional data assimilation for coupled physical-acoustical fields" in *Acoustic Variability 2002*, N. Pace and F. Jensen, Eds. Kluwer Academic Press (2002, pp. 417–424).
- [9] J. K. LEWIS, J. RUDZINSKY, S. RAJAN, P. J. STEIN and A. VANDIVER: "Model-oriented ocean tomography using higher frequency bottom-mounted hydrophones". *J. Acoust. Soc. Amer.* (vol. 117, no. 6, pp. 3539–3554, 2005).
- [10] O. CARRIÈRE, J-P. HERMAND, J-C. LE GAC and M. RIXEN: "Fullfield tomography and Kalman tracking of the range-dependent sound speed field in a coastal water environment". *Journal of Marine Systems. Special issue on MREA and Coastal Processes: Challenges for Monitoring and Prediction* (vol. 78, pp. S382–S392, 2009, doi:10.1016/j.jmarsys.2009.01.036).
- [11] P. ELISSEEFF, H. SCHMIDT and W. XU: "Ocean acoustic tomography as a data assimilation problem". *IEEE J. Ocean. Eng.* (vol. 27, no. 2, pp. 275–282, 2002).
- [12] G. CAMBON, S. SPEICH, P. MARCHESIELLO and L. MEMERY: "Modelling of the Iroise Sea: sensitivity of the Ushant tidal mixing front and lagrangian cross-frontal exchange". *Geophysical Research Abstracts* (vol. 9, no. 04113, 2007).
- [13] P. LAZURE and F. DUMAS: "An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model at regional scale (MARS)". *Adv. Wat. Res.* (vol. 31, pp. 233–250, 2008).
- [14] Y. MOREL: "Modeling coastal areas with HYCOM: results from the MOUTON project" HYCOM GODAE Meeting (April 24-26, 2007).
- [15] L. R. LE BLANC and F. H. MIDDLETON: "An underwater acoustic sound velocity data model". *J. Acoust. Soc. Amer.* (vol. 67, no. 6, pp. 2055–2062, 1980).
- [16] J. V. CANDY. *Model-Based Signal Processing*. New Jersey (John Wiley/IEEE Press, 2006).
- [17] S. M. JESUS, C. SOARES, E. F. COELHO and P. PICCO: "An experimental demonstration of blind ocean acoustic tomography". *J. Acoust. Soc. Amer.* (vol. 119, no. 3, pp. 1420–1431).
- [18] C. GERVAISE, S. VALLEZ, Y. STÉPHAN and Y. SIMARD: "Passive acoustic tomography: an efficient way to reduce acoustic emission in tomographic process – review, new concept & applications using marine mammals vocalises". *J. of the Marine Biol. Assoc. of United Kingdom* (vol. 87, pp. 5–10).
- [19] A. V. Van LEIJEN, J-P. HERMAND and M. MEYER: "Geoacoustic inversion in the north-eastern Caribbean using a hydrographic survey vessel as a sound source of opportunity". *Journal of Marine Systems* (vol. 78, pp. S333–S338, 2009, doi:10.1016/j.jmarsys.2009.01.036).

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le support du Fonds pour la formation à la Recherche dans l'Industrie et dans l'Agriculture (FRIA), Belgique. Le réseau d'excellence European Seas Observatory NETwork (ESONET), le 6^e programme cadre européen, priorité de recherche 1.1.6.3 Changement global et écosystèmes, Commission européenne, et le projet de recherche SINOBAD³ (contrat 08CR0002) financé par la Direction générale pour l'armement (DGA).

³ Système d'Inversion acoustique et Océanographique Basé sur l'Assimilation des Données.

ÉTUDE ACOUSTIQUE DU BRUIT DE MER

par Xavier Demoulin (1)

RÉSUMÉ

Le bruit dû au déferlement des vagues peut être identifié par des techniques acoustiques passives, qui permettent notamment de déterminer les quantités d'air qui sont injectées par les déferlements et remonter ainsi à leur caractérisation. Ces informations sont utiles à la communauté des scientifiques qui travaillent sur les échanges Océan - Atmosphère. Cet article présente quelques résultats expérimentaux obtenus en zones littorales qui ont pour but de mieux comprendre le lien entre les déferlements et le bruit ambiant.

ABSTRACT

Wave breaking contributes significantly to ambient noise. Passive monitoring of the latter makes possible to identify the amount of air due to wave breaking and invert it for characteristics of the sea surface. This information can be exploited by scientists working on exchanges between the ocean and the atmosphere. This paper present some experimental results aiming to better understand the relationship between wave breaking and the ambient noise in littoral areas.

(1) M.A.R.E.E. SAS - 6 rue Alphonse Rio - 56100 Lorient

SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION	5-3
2.	MESURES RÉALISÉES	5-3
2.1	Description des mesures	5-3
	2.1.1 Mesures par caisson immergé (Juin 2007 - Douarnenez)	5-3
	2.1.2 Mesures par bouée de surface (Sept. 2008 - Lorient)	5-4
2.2	Quelques résultats	5-4
	2.2.1 Inversion du vent.....	5-4
	2.2.2 Déferlements.....	5-4
3.	INTERPRÉTATION	5-6
3.1	Eléments d'océanographie.....	5-6
	3.1.1 Nuage de bulles et population de bulles.....	5-6
	3.1.2 Tailles des déferlements	5-7
	3.1.3 Couverture d'écume et densité de déferlements	5-7
3.2	Eléments d'acoustiques	5-7
	3.2.1 Oscillation simple	5-7
	3.2.2 Oscillation collective	5-8
3.3	Simulations.....	5-9
4.	MESURES COMPLÉMENTAIRES	5-10
4.1	Mesures complémentaires réalisées	5-10
4.2	Résultats préliminaires de mesures aériennes	5-10
5.	CONCLUSION	5-11
	BIBLIOGRAPHIE	5-11
	REMERCIEMENTS	5-12

1. INTRODUCTION

La forme de la surface de la mer et son agitation sont des paramètres intéressants les acousticiens par exemple pour évaluer des pertes de réflexions des ondes sonars à la surface ou encore, plus récemment, pour retrouver les paramètres géoacoustiques des fonds par le bruit généré par la surface de la mer [14]. Néanmoins, l'intérêt du bruit de mer ne se limite pas à l'acoustique sous-marine. Ainsi, en océanographie physique, la mesure du bruit de mer peut apporter des informations intéressantes sur le déferlement. En effet, des techniques acoustiques passives sont envisageables pour déterminer les quantités d'air qui sont injectées par les déferlements et remonter ainsi à leur caractérisation. Ces informations sont utiles à la communauté des scientifiques qui travaillent sur les échanges Océan - Atmosphère [1].

Le spectre du bruit de mer (appelé aussi bruit du vent) est dominant entre 100 Hz et 10 kHz. Il obéit à la fameuse règle des cinq de Wenz :

- doubler la fréquence (en kHz) diminue le niveau de bruit de 5 dB,
- doubler le vent (en nœuds) augmente le niveau de bruit de 5 dB (figure 1).

Cela s'exprime par : $NL(f, U) = 51 - 5 \log_2(f) + 5 \log_2(U/5)$.

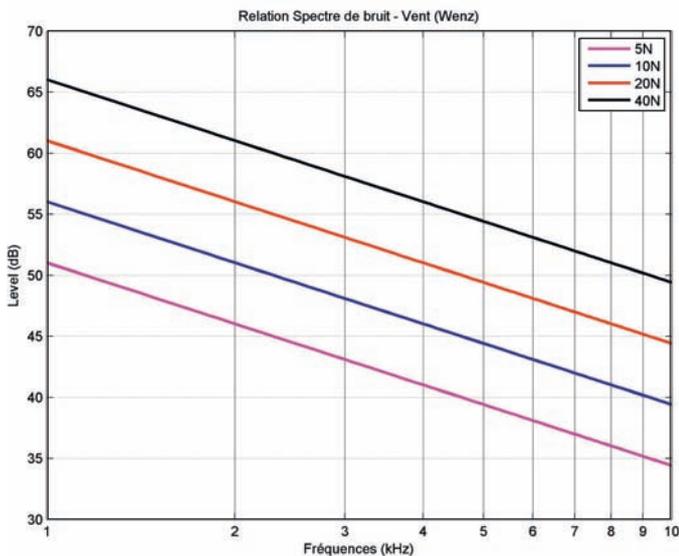


Figure 1 : Niveaux de bruit ambiant obtenu par le modèle de Wenz en suivant la règle des cinq à 5, 10, 20 et 40 nœuds.

En fait, le bruit du vent est réputé provenir de l'agrégation d'évènements (les déferlements), chacun de ces évènements constituant une source sonore produite par la création et l'entraînement de bulles d'air [3]. Pour l'acousticien, le problème posé (inverser les quantités d'air injectées sous forme de bulles) est plutôt simple *a priori*. Pourtant, à y regarder de plus près, le mécanisme expliquant cela est complexe et on voit alors que notre connaissance intime de ce qu'il se passe est plus modeste.

Cet article présente les analyses de mesures réalisées entre 2007 et 2009 visant à étudier la relation entre le bruit de mer et le déferlement. Au travers de ces analyses, on est amené à :

- revisiter la loi de Wenz [2], loi empirique reliant le spectre du bruit de mer à la vitesse du vent,
- étudier plus en détail les liens existant entre le bruit de mer et les caractéristiques des déferlements.

La première partie présente quelques mesures réalisées en mer. La deuxième partie présente quelques résultats obtenus à partir de ces mesures. La troisième partie fournit des informations nécessaires à l'interprétation de ces résultats. La quatrième partie se focalise sur les résultats préliminaires de mesures acoustiques aériennes qui ont été faites en complément des mesures sous-marines.

2. MESURES RÉALISÉES

Plusieurs séries de mesures de bruit de mer ont été réalisées entre 2007 et 2009. L'essentiel des résultats présentés se base sur deux jeux de données :

- un jeu de données de 24 h acquis en juin 2007 en baie de Douarnenez à l'aide d'un caisson immergé équipé de deux hydrophones,
- un jeu de données d'une douzaine d'heures acquis en septembre 2008 au large de Lorient à l'aide d'une bouée de surface équipée de plusieurs capteurs, notamment des hydrophones et un microphone.

2.1 Description des mesures

2.1.1 Mesures par caisson immergé (Juin 2007 - Douarnenez)

Une mesure de bruit de mer exploitable est contraignante. La chaîne audio doit autoriser des mesures de niveaux faibles ce qui nécessite des hydrophones sensibles et une amplification du signal. La dynamique pouvant être très élevée, il est nécessaire de disposer de 24 bits. A cela s'ajoute l'extension spectrale du bruit de mer qui nécessite d'échantillonner à plus de 32 kHz ce qui entraîne des volumes de données élevés. Le support de mesure ne doit pas être bruyant (pas de bateau et de préférence pas de lien avec la surface agitée) et il ne doit pas y avoir de pollution sonore. Enfin, son autonomie doit être de plus de 24 heures, ce qui nécessite une faible consommation électrique.

Le prototype utilisé pour ces mesures a été construit en fonction de ces contraintes (figure 2).

Il a été choisi d'enregistrer des séquences de 70 secondes toutes les 10 minutes, ceci sur une durée de 24 heures environ. Deux hydrophones (sensibilité de -171 dB/V) séparés de 5 m ont été utilisés. Les signaux étaient échantillonnés à 44,1 kHz sur 24 bits. La hauteur d'eau était de 20 m environ.

Un premier jeu de données a ainsi été constitué dans des conditions de vents variées. Sa qualité est très bonne (peu de pollutions par des bruits propres ou par des événements extérieurs). Il n'y a par contre pas eu de mesures complémentaires (météorologiques ou océanographiques).

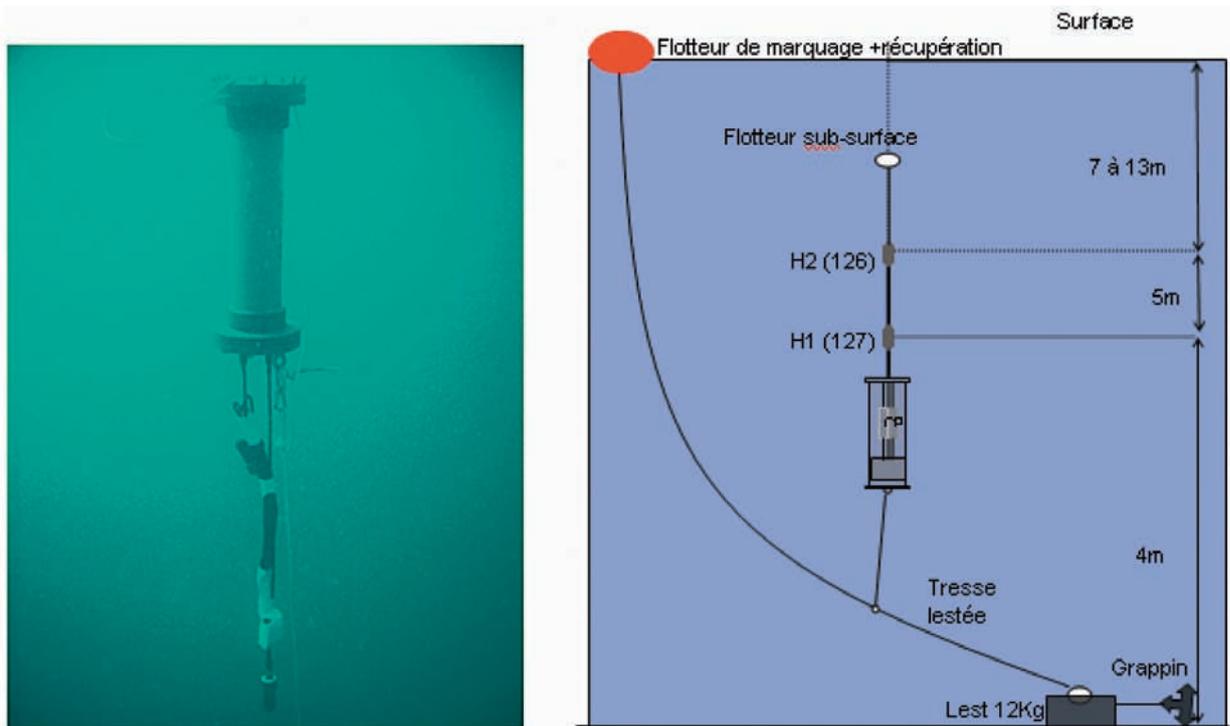


Figure 2 : A gauche, photo du dispositif d'enregistrement acoustique en opération (dans notre cas, les hydrophones étaient orientés vers le haut). A droite, dessin du mouillage ayant servi pour les mesures acoustiques lors des mesures de Douarnenez.

2.1.2 Mesures par bouée de surface (Sept. 2008 - Lorient)

Il est vite apparu nécessaire de compléter nos acquisitions acoustiques par d'autres mesures issues de capteurs optiques, océanographiques (mesures de vagues) ou météorologiques (vent).

Nous avons donc entrepris de développer une bouée de surface dont la quille permet de recevoir des capteurs acoustiques et optiques pour les acquisitions sous-marines et dont le mât permet de recevoir des capteurs acoustiques et optiques pour les acquisitions aériennes (figure 3).

En fait, il y a eu de nombreuses évolutions du prototype présenté ainsi que plusieurs prises de mesures entre juillet 2008 et décembre 2009. Parmi elles, une acquisition d'une dizaine d'heures combinant mesures acoustiques passives aériennes, sous-marines, prises de vues et célérimètre a été réalisée en septembre 2008. Il a été choisi d'enregistrer des séquences de 10 minutes toutes les 30 minutes, sur une durée de 10 heures. La hauteur d'eau était de 20 m.

Un second jeu de données a ainsi été constitué dans des conditions de vent de 15 nœuds environ. Sa qualité est plutôt médiocre (pollutions par les signaux du célérimètre ou par du trafic) mais un premier jeu de données d'acoustique aérienne a ainsi pu être établi.

2.2 Quelques résultats

Les résultats présentés concernent le jeu de données de

2007. Les résultats préliminaires incluant l'acoustique aérienne sont présentés au § 4.2.

2.2.1 Inversion du vent

Une première appréciation des données est faite en réalisant une analyse temps - fréquences pour chaque séquence. On les regroupe ensuite pour suivre grossièrement l'évolution du contenu spectral de tout le jeu de données sur les 24 heures. On stocke alors l'intensité moyenne contenue dans la " bande météo " (incluse dans la bande 500 Hz à 10 kHz). On peut alors aisément suivre les grandes tendances de l'évolution météorologique sur le site au cours des enregistrements.

Une fois les séquences polluées par le trafic ou la pluie supprimées, nous avons pu constater la conformité de nos spectres avec des spectres de Wenz. Nous avons donc utilisé la loi de Wenz pour réaliser une inversion de la force du vent pour chaque séquence par minimisation aux moindres carrés entre cette expression et nos données (entre 1 kHz et 6 kHz, figure 4).

2.2.2 Déferlements

Il est apparu intéressant d'analyser plus en détail les variations du signal au cours du temps au sein d'une séquence. Une première constatation est que les déferlements sont audibles à l'oreille. Leur présence régulière apparaît clairement à l'aide d'une analyse temps - fréquences, (figure 5).

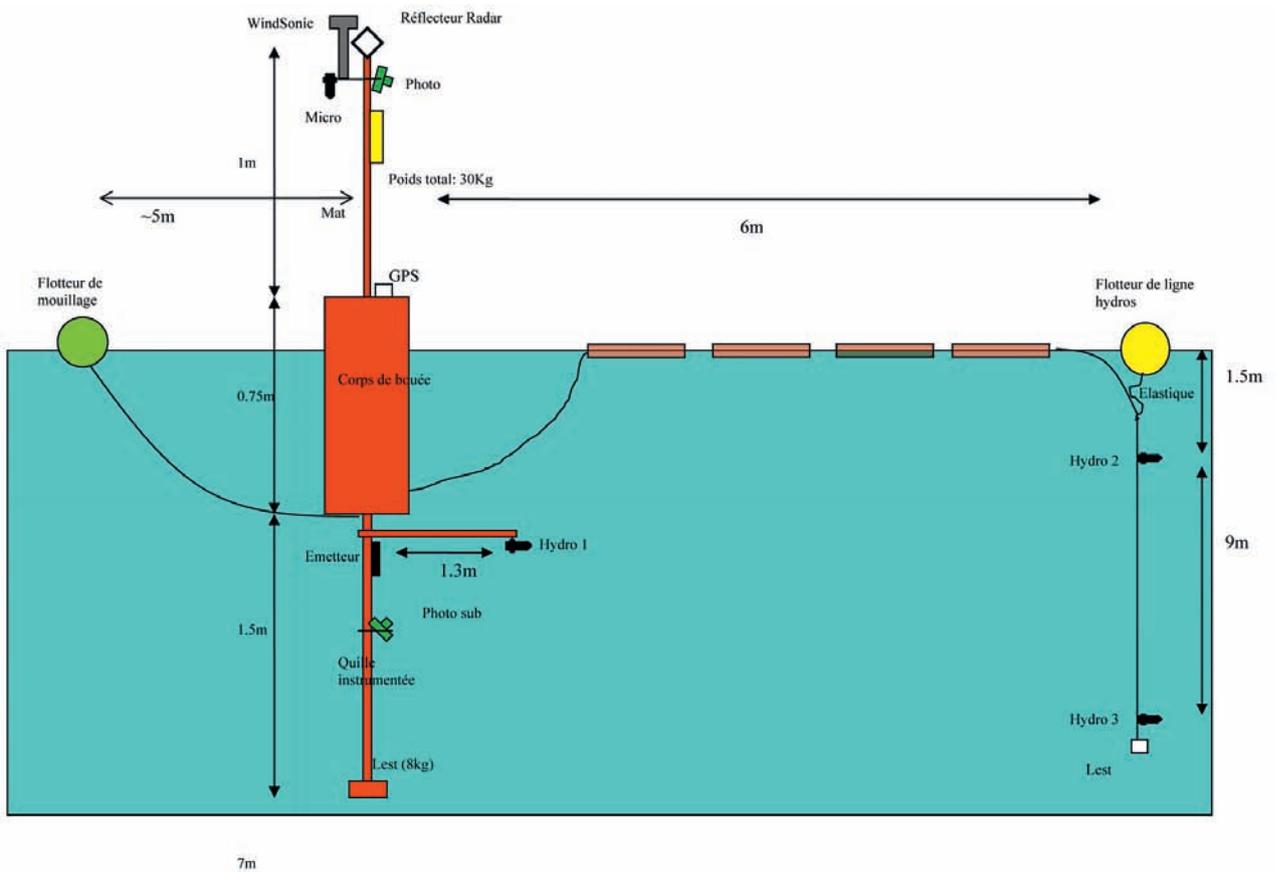


Figure 3 : Schéma du prototype réalisé. Il est dédié à l'étude des déferlements. Il permet des acquisitions à l'aide d'hydrophones et de microphones. Parallèlement, un dispositif de mesure de vitesse du son a été installé dans la quille. Des prises de vues depuis le mât ou depuis la quille sont possibles.

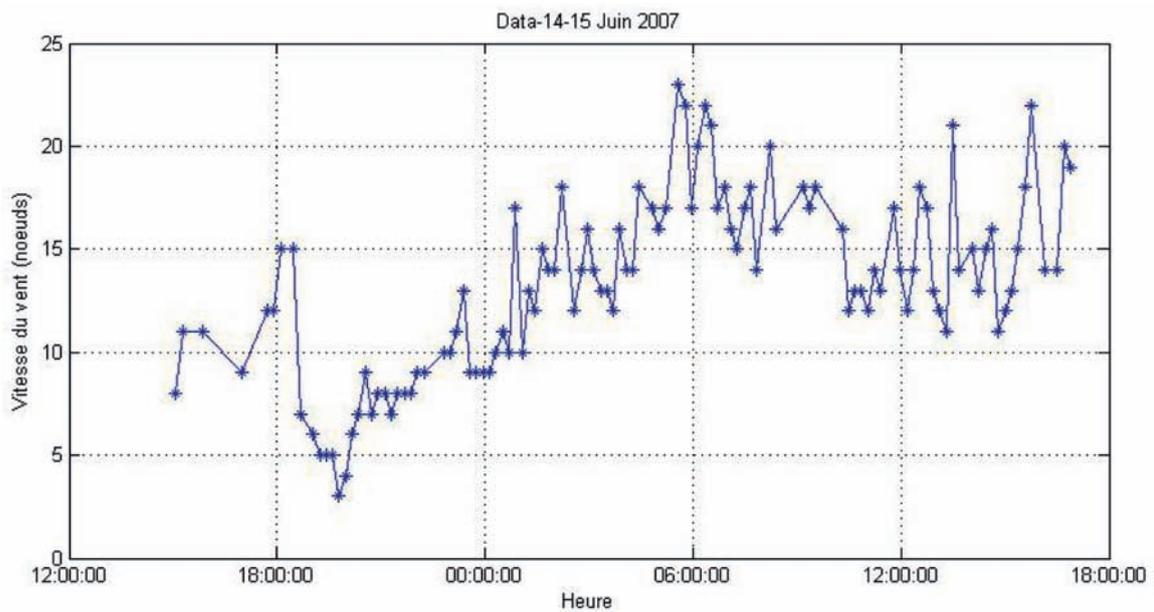


Figure 4 : Vitesse du vent (en nœuds) en fonction de l'heure (une seule vitesse par séquence).

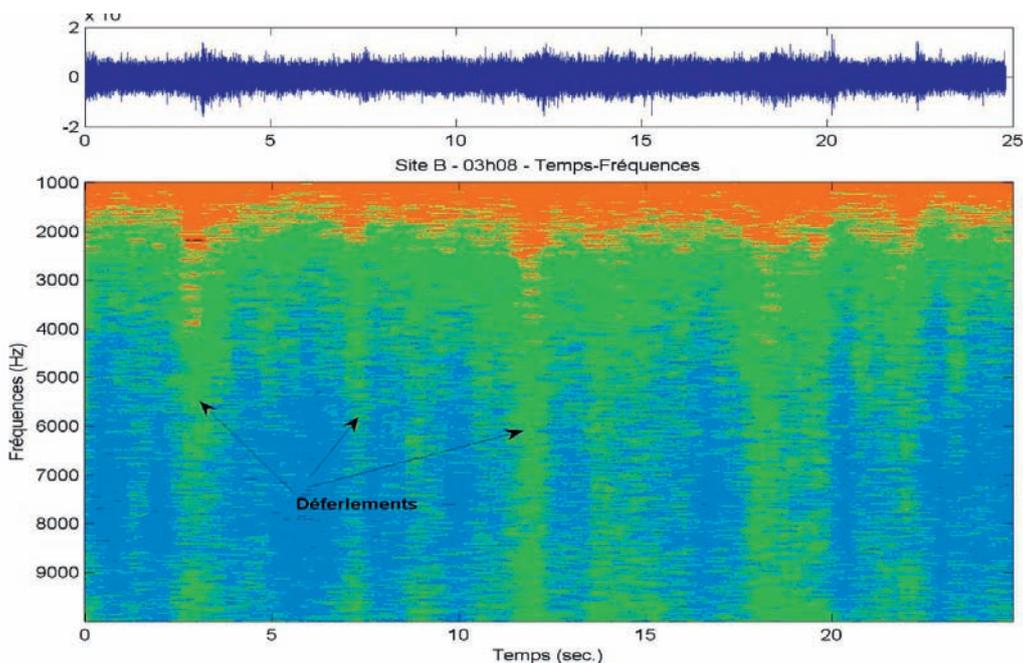


Figure 5 : Identification des déferlements sur 25 secondes d'une séquence donnée.

Les déferlements marquent efficacement le signal dans la gamme de fréquence allant de 500 Hz à 10 kHz. En considérant des durées (des déferlements) de l'ordre de la seconde, une moyenne de la DSP⁽¹⁾ sur 0,5 seconde typiquement permet d'obtenir un signal en fonction du temps, appelé signal de référence, qui fait bien ressortir ces déferlements [12]. On peut considérer que nos signaux de référence se présentent sous la forme d'un bruit de fond (dénommé background) parcouru de pics (dénommé signal des pics) qui sont des déferlements d'une "certaine échelle" (figure 6).

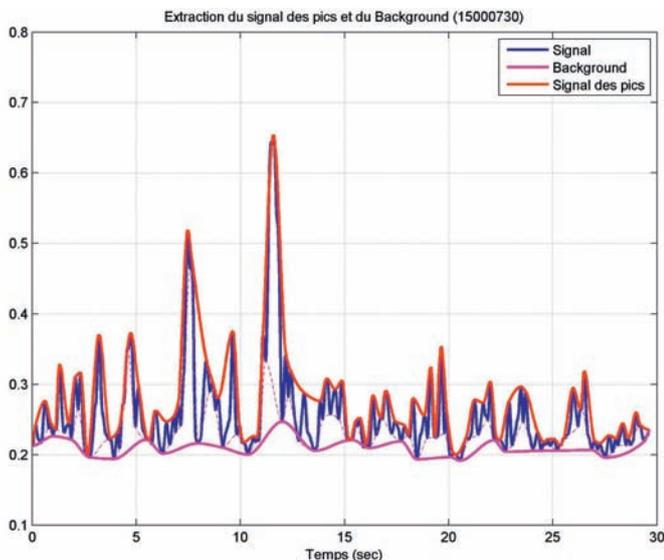


Figure 6 : Background (en magenta), signal des pics (en rouge) et signal de référence (en bleu).

En reprenant le même type de calcul avec un paramétrage différent dans le but de faire ressortir les variations rapides du signal, on constate qu'il y a une pluralité d'échelles de

(1) Densité Spectrale de Puissance

pics. On peut par exemple appliquer les techniques de décomposition du signal en modes empiriques (transformée de Hilbert Huang, [13]).

Les variations lentes sont constituées de pics de forte énergie (des déferlements). Ils ont des durées typiques de 1 s, une périodicité de 2,5 s environ (entre 0,33 Hz et 0,5 Hz). Le spectre d'un déferlement a déjà la forme d'un spectre de Wenz. La fréquence dominante des variations rapides (micro - déferlements ?) se situe vers 20 Hz (fréquence des capillaires).

3. INTERPRÉTATION

3.1 Éléments d'océanographie

Disposant d'informations acoustiques sur les déferlements dont on suspecte qu'elles sont en rapport avec des excitations de bulles, il est utile de rappeler quelques ordres de grandeur connus caractérisant les déferlements et les nuages de bulles associés. On s'intéresse plus précisément ici :

- aux populations de bulles dans les nuages de bulles (*bubble plume*) des déferlements au cours de leur cycle de vie et à la fraction d'air (*void ratio*, β)
- aux quantités de moutons (*whitecaps*), à leurs tailles et à leurs durées de vie.

3.1.1 Nuage de bulles et population de bulles

Certaines références [4] décrivent utilement le cycle de vie d'un nuage de bulles selon 3 phases :

- La phase α est la situation initiale du nuage à sa formation. Les ordres de grandeurs sont : durée 1 s, *void* β (ratio de volume d'air sur le volume d'eau) de $5 \cdot 10^{-2}$, extension spatiale de $0,5 \text{ m}^2$.

- La phase β est la phase de transformation du nuage au cours de son entraînement. Les ordres de grandeurs sont : durée 3 - 4 s, $void \beta$ de $5 \cdot 10^{-4}$, extension spatiale de quelques m^2 se rétrécissant avec la profondeur.
- La phase γ , en spéculant un peu, est la phase de retour à l'équilibre et d'intégration au nuage "permanent". Les ordres de grandeurs sont : durée >100 s, $void \beta$ de $5 \cdot 10^{-7}$, extension spatiale de quelques centaines de m^2 se rétrécissant avec la profondeur. Il n'est plus visible de la surface.

Ce nuage vient alimenter la couche bulleuse permanente (*background bubble layer*) qui est la résultante des déferlements. Elle est permanente et le $void \beta$ est typiquement de l'ordre de $5 \cdot 10^{-9}$ (figure 7).

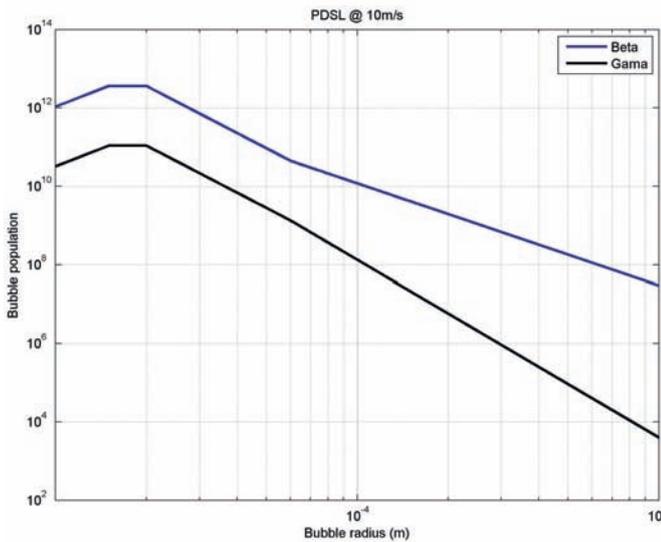


Figure 7 : Densité de population de bulles pour la couche bulleuse en m^{-4} pour un vent de 10 ms^{-1} .

3.1.2 Tailles des déferlements

On ne peut exprimer les tailles des déferlements que par ce que l'on en voit, c'est-à-dire soit par les surfaces d'écume (*sea-foam*), soit par les extensions spatiales du nuage de bulles (*void fraction*). Les éléments présentés sont largement empruntés aux travaux en référence [5] réalisés sur des déferlements glissants (*spilling breakers*). On distingue une période de croissance linéaire (phase α) et une décroissance exponentielle (phase β et γ). La durée de montée est $T_m = 5c/g \sim 0,8 \cdot T_e$, T_e période de la vague qui la porte.

On trouve typiquement des durées (de phase active) de 1 à 3 secondes et des extensions spatiales de 0,5 à 10 m^2 (figure 8).

3.1.3 Couverture d'écume et densité de déferlements

Les taux de couverture d'écume s'expriment en pourcentage de la surface totale. Ils ont été déterminés expérimentalement par photographie ([6], figure 9).

A partir du pourcentage de couverture et des tailles de déferlements, il est possible d'établir des relations établissant la distance inter-événements D_{ie} en fonction du vent [7].

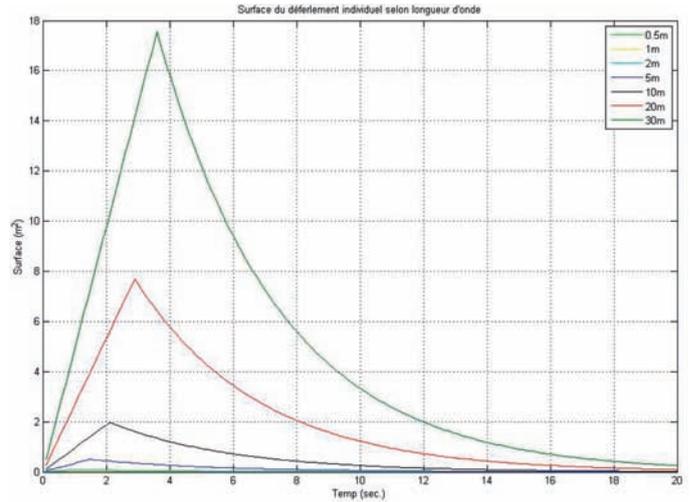


Figure 8 : Estimation de la surface occupée par l'écume d'un déferlement au cours de son cycle de vie en fonction de la longueur d'onde de la vague qui le porte.

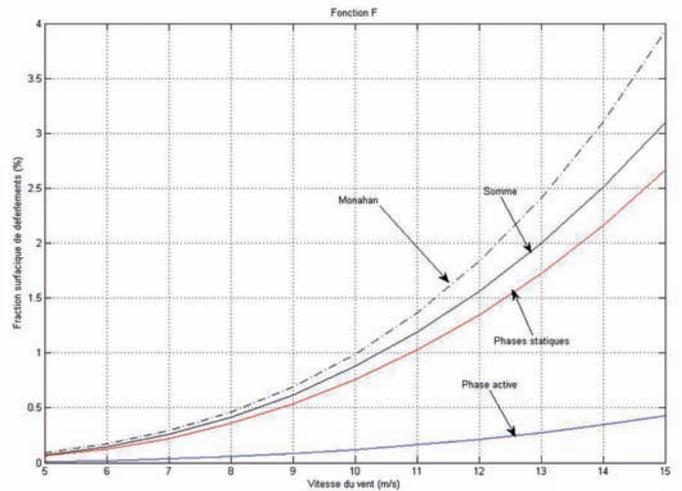


Figure 9 : Pourcentage surfacique de déferlements en fonction du vent calculé (en bleu, phase α et en rouge phases β et γ). En pointillés, comparaison avec la formule empirique simplifiée de Monahan.

Sous l'hypothèse de symétrie cylindrique et en simplifiant, cela permet d'établir D_e , la densité d'événements en nombre m^{-2} .

$$D_e = \frac{4}{\pi \cdot (237)^2} \cdot u_{10}^{2.14}$$

Ce type d'expression est très utile pour l'analyse des signaux acoustiques.

3.2 Éléments d'acoustiques

Il est important de rappeler les liens entre l'acoustique des bulles et les intensités sonores qui sont mesurées.

3.2.1 Oscillation simple

On rappelle [8] que sous certaines hypothèses une bulle d'air dans l'eau oscille avec une amplitude $d_a = \epsilon_0$ autour de sa position d'équilibre à sa fréquence de résonance selon

l'équation :

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_0}{\partial t^2} + 2\lambda \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial t} + w_0^2 \varepsilon_0 = 0 ,$$

avec $w_0 = \sqrt{\frac{s}{m}} = \frac{1}{a} \cdot \left(\frac{3\gamma P}{\rho}\right)^{1/2}$ pulsation de résonance de Minnaert et :

P, pression de l'air au niveau de la bulle ($\sim 10^5$ Pa)

γ , ratio de chaleurs spécifiques (1,4)

ρ , densité de l'eau (10^3 Kg m^{-3})

$\lambda = R_m/2m = w_0 \delta/2$

En "analogie ressort", m est bien associé à la masse, δ au frottement dont on comprend bien qu'il est au moins associé à la viscosité de l'eau et le coefficient de rigidité à la chaleur spécifique qui exprime le lien entre pression et volume.

En définissant l'excitation ε comme $\delta a/a_0$, on montre alors que :

$$P(R,t) = \alpha \cdot \varepsilon \cdot L \cdot \sin(w_0 t) \cdot \exp^{-\delta w_0 t/2} ,$$

$$\text{avec : } \alpha = \left(\frac{3\gamma P}{\rho}\right)^{3/2} \cdot \frac{\rho}{c} \cdot \frac{1}{R} \cdot \cos\theta .$$

Dans le domaine des fréquences, on a après transformée de Fourier :

$$P(w) = TF(P(r,t)) = \frac{\alpha \cdot \varepsilon \cdot L \cdot w_0}{\left[(w_0^2 \cdot (1 + \frac{\delta^2}{4}) - w^2)^2 + \delta^2 w^2 \right]^{1/2}} .$$

L'amplitude de la pression rayonnée dépend avant tout de l'excitation ε (et de L en dipolaire, figure 10).

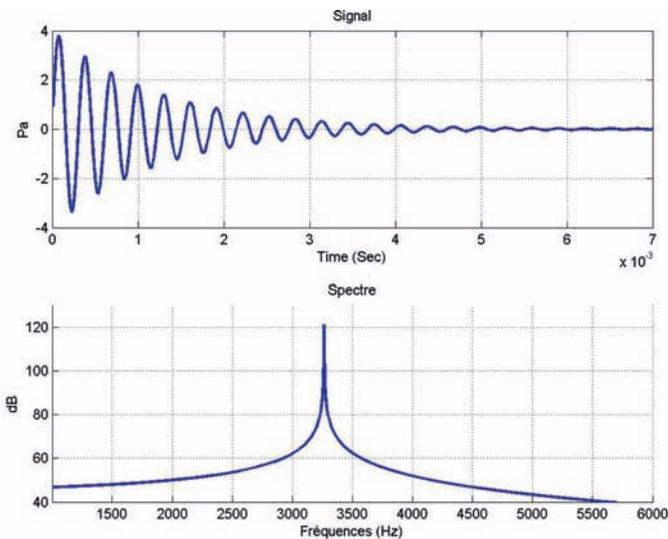


Figure 10 : En haut, pression rayonnée à 1 m par une bulle de rayon 1 mm placée à 10 cm sous la surface avec $\varepsilon=510^{-2}$. En bas, spectre correspondant.

En première approximation, on peut donc considérer qu'une bulle oscillante de rayon a_0 est un Dirac en fréquence. On peut alors faire le lien entre le spectre de bruit d'un nuage de bulles et une population de bulles. La difficulté majeure vient de l'excitation qui n'est pas connue. En simplifiant, deux bulles de rayon r_0 et d'excitation 1ε génèrent la même intensité qu'une seule bulle de même taille d'excitation 2ε .

3.2.2 Oscillation collective

Un déferlement est caractérisé par une distribution de taille de bulles qui varie typiquement de 50 μm à 1 mm pour de l'eau salée. Dans ce cas, les fréquences de Minnaert vont de 3 à 70 kHz. Or, le spectre observé associé au vent (*i.e.* au déferlement) couvre une gamme de fréquences bien plus faible. Depuis 1985 environ, de nombreux articles [9] ont fait apparaître que le nuage de bulles pouvait être responsable d'oscillations couplées entre les bulles sont aptes à expliquer cette dérive vers les basses fréquences. On établit une relation entre les bulles oscillantes par un coefficient de couplage. On comprend que cela conduit à un ensemble d'équations du second degré qu'on peut assembler sous un formalisme matriciel. Le problème revient alors à rechercher les solutions qui annulent le déterminant : c'est un problème de modes propres appelé le modèle du nuage de bulles (*bubble mixture model*).

Dans le cas d'un nuage de longueur L, les modes propres de pulsation du nuage lui-même s'expriment selon :

$\omega_k = k \cdot c_m / 2L$, ordre du mode ($k=1,2,\dots$) avec c_m , vitesse du son dans la couche de mixture.

Dans le cas particulier d'une distribution de bulles de tailles égales, $\beta \sim (a^3/L^3) \cdot N$, on arrive à :

$$\frac{w_k}{w_0} \cong \frac{k}{\beta^{1/6} \cdot N^{1/3}} .$$

Ce résultat est le plus explicite car il rend compte de la dérive vers les basses fréquences.

Si $N = 1\,000$, la fréquence est divisée par 10.

En résumé, le nuage de bulles est modélisé comme une hémisphère oscillante à des fréquences qui dépendent du nombre de bulles d'une taille donnée et donc de la distribution de leur taille. En considérant le *void ratio* β d'une hémisphère de rayon r_a , on montre que le nuage de bulles a son mode fondamental d'oscillation f_0 selon :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi r_a} \sqrt{\frac{3\gamma P}{\rho \beta}} \text{ (figure 11).}$$

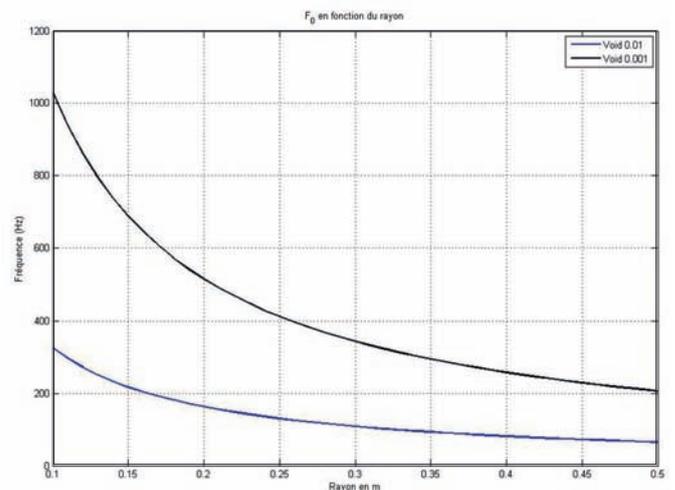


Figure 11 : Fréquence fondamentale d'oscillation d'un nuage de bulle (oscillations collectives) en fonction du rayon de l'hémisphère pour deux valeurs de β (10^{-2} et 10^{-3}).

Là aussi, on peut alors faire le lien entre le spectre de bruit d'un nuage de bulles et une population de bulles.

Il est passablement dérangeant de constater que des modèles d'oscillations individuelles et d'oscillations collectives aient pu coexister pour expliquer l'allure spectrale du bruit du vent. Faute de mise en évidence expérimentale et d'autres informations plus récentes sur le sujet, on en restera là.

3.3 Simulations

La construction du problème direct reliant des populations de bulles à l'intensité totale acoustique reçue sur un hydrophone à la profondeur Z_h se base sur une modélisation des sources d'une part et sur une modélisation de la propagation d'autre part. L'étape intermédiaire qu'on se propose ici de faire est de simuler simplement l'intensité du signal en fonction du temps. En faisant quelques hypothèses (contribution des seuls trajets directs, sommation incohérente des déferlements distants), on peut alors estimer la fonction intensité totale comme étant la somme des intensités des déferlements distants avec les éléments suivants :

- on considère une durée d'observation T_{tot} ;

- on considère la fonction de distribution des évènements D_e dont on déduit le nombre d'évènements N_e dans un rayon $5 \cdot Z_h$;
- on les répartit aléatoirement dans le disque de même rayon et aléatoirement dans le temps entre 0 et T_{tot} ;
- on prend alors une fonction durée des déferlements, ici choisi comme une loi de Rayleigh en fonction du vent W ;
- de même, on prend une fonction intensité du même type (conforme à ce qui a été observé) ;
- on considère une fonction intensité = $f(t)$ pour un déferlement individuel en forme de fenêtre de Blackman (sans grande importance à ce stade).

On peut alors sommer toutes ces contributions et obtenir le signal $I_{tot} = f(\text{temps})$.

Ces simulations sont encore bien incomplètes. Elles permettent toutefois déjà de jouer sur différents paramètres pour évaluer leur effet numériquement. On constate qu'on retrouve des signaux temporels en "signal des pics" mais qu'il n'y a pas de "background" (figure 12).

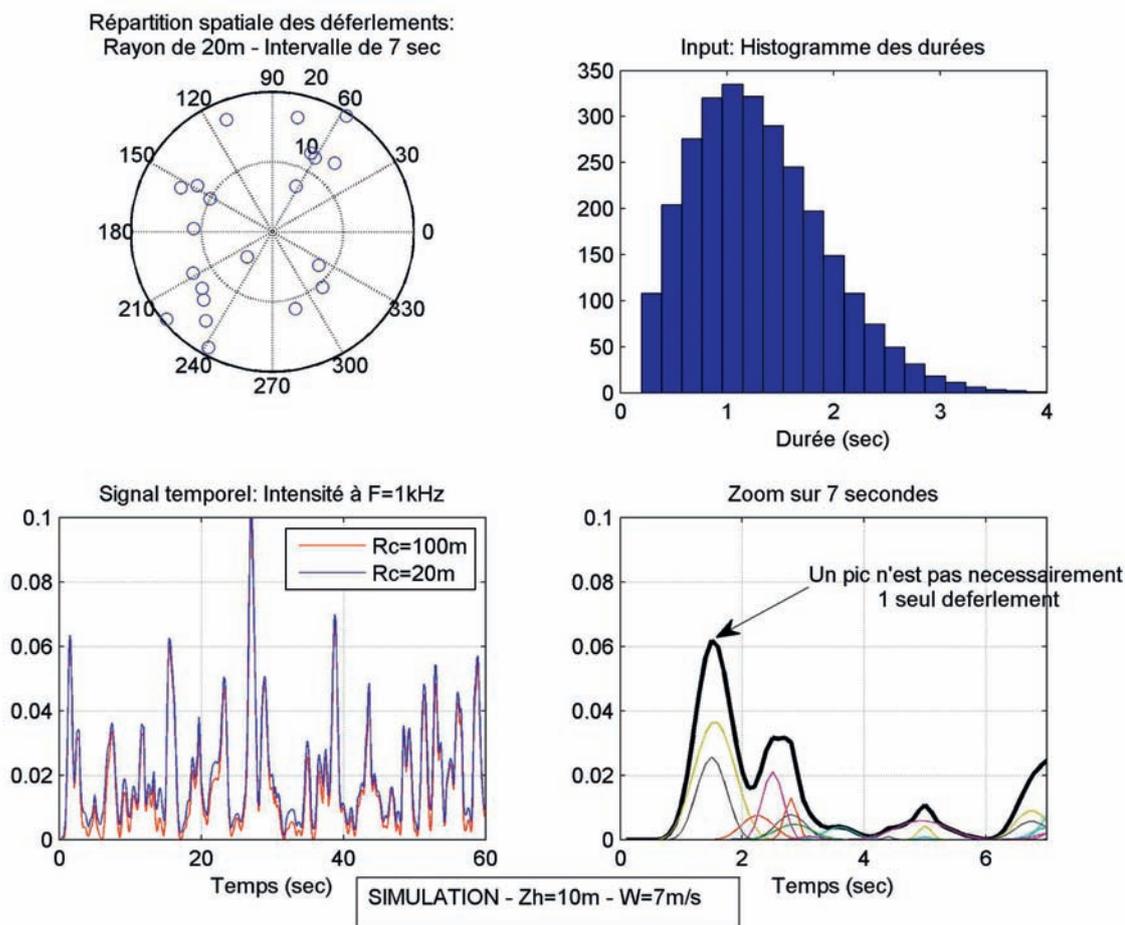


Figure 12 : Résultats de simulations simplifiées. En haut à gauche, positions des déferlements autour de l'hydrophone dans un rayon de 20 m et pour 7 secondes de signal ; on a une vingtaine d'évènements. En haut à droite, histogramme des durées de déferlements (donnée d'entrée). En bas à gauche, signal temporel résultant (en rouge, toutes contributions confondues ; en bleu, contributions dans un rayon de 2 Z_h seulement). Ce type de résultat est très proche de ce qu'on obtient sur les données réelles. En bas à droite, zoom sur le premier double pic qui montre qu'un pic est une sommation de plusieurs contributions distinctes.

4. MESURES COMPLÉMENTAIRES

4.1 Mesures complémentaires réalisées

Devant les difficultés d'interprétation révélées par l'analyse des données acoustiques sous-marines, il est vite apparu opportun d'ajouter d'autres capteurs au prototype de mesure. Nous avons par conséquent ajouté un microphone, des appareils photographiques (aérien ou sous-marin), un anémomètre, un compas, un capteur de pression (mesure du spectre omnidirectionnel de vagues). De façon plus ponctuelle, un capteur d'oxygène dissous et un célérimètre ont été testés. Nous nous focalisons ici sur le potentiel de l'acoustique aérienne passive au travers des premiers résultats obtenus.

4.2 Résultats préliminaires de mesures aériennes

On rappelle brièvement les objectifs de l'enregistrement des déferlements à l'aide d'un microphone. L'atténuation du son avec la distance étant de l'ordre de 50 fois plus élevée dans l'air que dans l'eau, les capteurs enregistrent des phénomènes locaux et ne sont pas pollués par des événements lointains (comme cela arrive trop souvent avec des hydrophones). Comme le mécanisme de génération du son aérien n'est *a priori* pas le même que dans l'eau, les signaux aériens de déferlements pourraient s'avérer complémentaires des signaux sous-marins.

Le microphone utilisé était un ATM33a (Audio-Technica) alimenté par une pile interne 1,5V. Il était monté sur le mât d'antenne, protégé par une bonnette anti-vent sofitie (Rycote) et monté sur une rotule anti-vibration (Beyer Dynamic). Les acquisitions ont été faites simultanément aux acquisitions sous-marines (16 bits - 44 kHz).

Les niveaux absolus des signaux hydrophoniques sont calculés comme suit :

- correction du voltage des séquences temporelles par le gain carte,
- correction de la réponse en fréquence de l'hydrophone,
- correction de la réponse en fréquence de la bonnette anti-vent,
- rapport au niveau de référence dans l'air de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

On procède ensuite d'une façon similaire à ce qui a été fait pour les hydrophones.

L'identification et l'évaluation qualitative des déferlements se fait de la même façon. Les signaux temporels présentent des caractéristiques assez proches de celles des signaux sous-marins (figure 13).

En revanche, nous avons noté dans nos signaux aériens de déferlements deux phases distinctes, nettement perceptibles à l'oreille (figure 14).

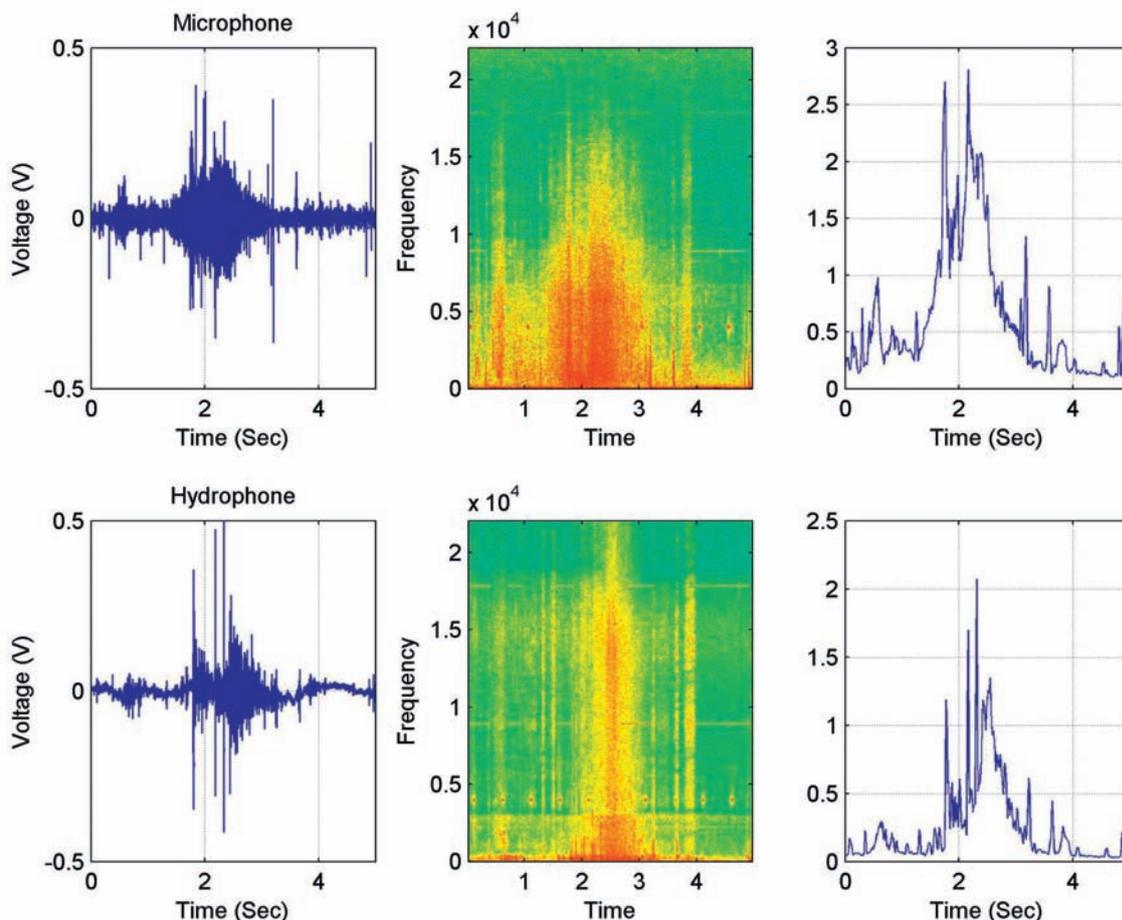


Figure 13 : Identification et caractérisation d'un même déferlement enregistré par un microphone (en haut) et par un hydrophone (en bas). De gauche à droite : signal brut temporel, spectrogramme et signal temporel de l'intensité moyenne entre 0,1 et 8 kHz.

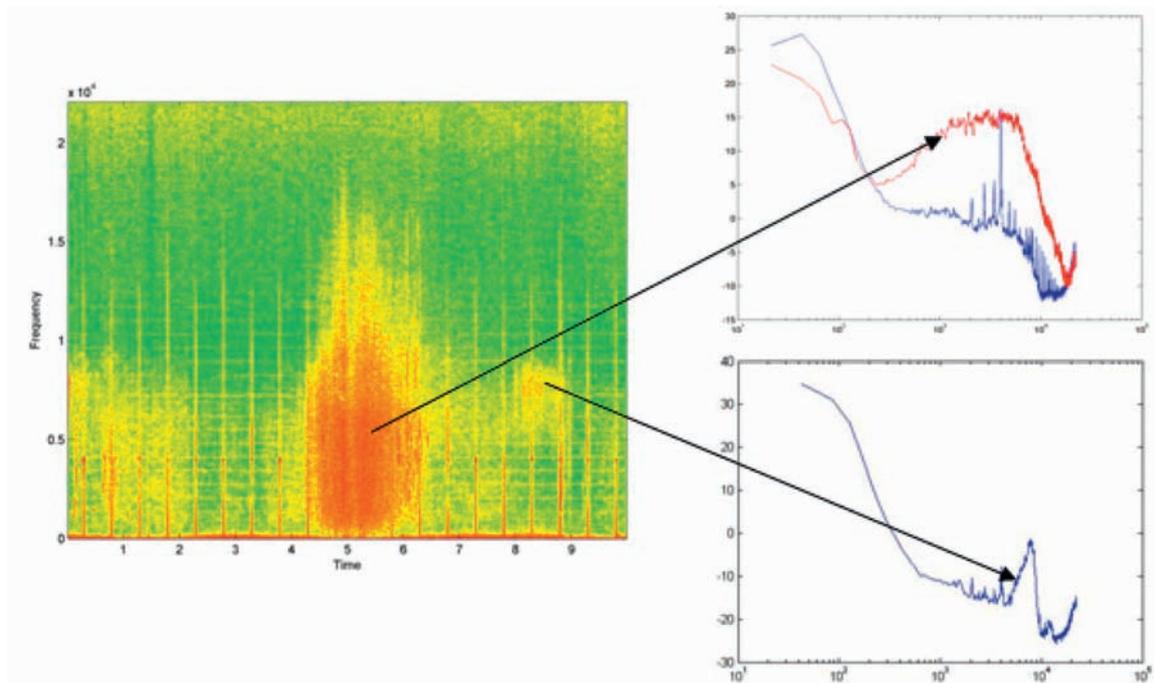


Figure 14 : Spectrogramme d'un déferlement acquis en aérien. En haut à droite, spectre de la première phase du déferlement (en rouge). En bas à droite, spectre de la seconde phase du déferlement.

Nous avons appelé cette seconde partie "dégazage" puisque nous pensons qu'elle est en rapport avec l'éclatement des bulles entraînées. Nous proposons deux candidats possibles pour décrire ce bruit : le *burst* [10] (basé sur un modèle de résonateur de Helmholtz) ou bien l'avalanche de *pops* [11]. Le *burst* correspond à l'éclatement à la surface d'une bulle d'air lorsqu'elle est remontée à la surface. Le *pops* correspond à l'éclatement (rupture de la membrane) d'une bulle de mousse (*foam*) dans l'air. Quoiqu'il en soit, il apparaît des informations complémentaires et prometteuses. Toutefois, des efforts importants restent à faire pour comprendre et exploiter ces signaux.

5. CONCLUSION

Les éléments présentés constituent un survol de résultats accumulés sur le bruit de mer entre 2007 et 2009. Ils montrent une réelle richesse des mesures acoustiques passives comme moyen d'étude des déferlements. Le potentiel de ces mesures pour réaliser des inversions sur les paramètres des déferlements est réel. Leur pleine exploitation reste cependant difficile et nous ne sommes pas encore parvenus à recueillir un jeu de données de référence.

Le succès de futures inversions est cependant conditionné par une bonne compréhension des mécanismes mis en jeu. Par exemple, il n'est pas certain que toutes les sources soient identifiées ; il est en effet étonnant que le spectre de bruit suive déjà la loi de Wenz par vent très faible (lorsqu'il n'y a pas de déferlement).

Les mécanismes physiques participant au bruit de mer sont assurément très complexes. Il est cependant possible que quelques observations simples issues de mesures à la mer apportent un précieux complément d'informations.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MELVILLE and R.J. RAPP: "Momentum flux in breaking waves", *Nature* (317, 514-516, 1985).
- [2] G. WENZ: "Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources". *J.Acoust.Soc.Am.* (34, 1936-1956, 1962).
- [3] H. MEDWIN and M.M. BEAK: "Bubble sources of the Knudsen sea noise spectra". *J.Acoust.Soc.Am.* (86(3) 1124-1130, 1989).
- [4] E.C. MONAHAN and M. LU: "Acoustically relevant bubble assemblages and their dependence on meteorological parameters". *IEEE J.Oceanic Eng.* (vol.15, Nro4, pp. 340-349, 1990).
- [5] N.REUL and B.CHAPRON: "A model of sea-foam thickness distribution for passive microwave remote sensing applications". *J.Geophys.Res.* (108(C10), 3321, 2003).
- [6] V.G. BONDUR and E.A. SHARKOV: "Statistical properties of whitecaps on a rough sea". *Oceanology* (22, 274-279, 1982).
- [7] J. WU: "Individual characteristics of whitecaps and volumetric description of bubbles". *IEEE J.Oceanic Eng.* (vol.17, Nro1, pp. 150-158, 1992).
- [8] T.G. LEIGHTON: "The acoustic bubble". *Academic Press*, 2004.
- [9] A. PROSPERETTI: "Bubble-related ambient noise in the ocean". *J.Acoust.Soc.Am.* (84(3) 1042-1054, 1988).

[10] D.E. SPIEL: "Acoustical measurements of air bubbles bursting at a water surface: bursting bubbles as Helmholtz resonators". *JGR*. (vol.97 (C7), pp11443-11452, 1992).

[11] N. VANDEWALLE et al., "Avalanches of popping bubbles in collapsing foams". *Phys.Rev.Let.* (vol.86(1), pp 179-182, 2001).

[12] L. DING and D.M. FARMER: "Observations of breaking surface wave statistics". *J.of Phys. Oceano.* (vol.24, pp. 1368-1387, 1994).

[13] N.E. HUANG and S.S.P. SHEN: "Hilbert-Huang transform and its applications". *World Scientific Publishing* (2005).

[14] C.R. HARRISON and D.G. SIMON: "Geoacoustic inversion of ambient noise: a simple method". *J Acoust Soc Am.* (Oct. 112(4): 1377-89, 2002).

REMERCIEMENTS

Les travaux sur l'acoustique sous-marine passive ont été commandés par le CERSAT²/Ifremer. Les travaux sur l'acoustique aérienne ont été commandés par l'ENSTB³ dans le cadre du projet MODENA⁴. L'auteur remercie B. Chapron et N. Reul (Ifremer) ainsi que R. Garelli (ENSTB) d'avoir permis ces travaux.

² Centre ERS d'Archivage et de Traitement

³ Ecole Nationale Supérieure de Télécommunication de Bretagne

⁴ Modélisation de l'Observation à Distance de l'ENvironnement mAritime

MONITORAGE ACOUSTIQUE PASSIF DES CAMPAGNES D'OCÉANOGRAPHIE ACOUSTIQUE EN PRÉSENCE DE MAMMIFÈRES MARINS : EXEMPLE DE LA CAMPAGNE ERATO-09

par Cédric Gervaise ⁽¹⁾, Lucia Di Iorio ⁽¹⁾, Bazile Kinda ⁽¹⁾, Yann Stéphan ⁽²⁾, Nicolas Josso ⁽³⁾

RÉSUMÉ

En septembre 2009, pendant 2 jours, une campagne d'inversion géoacoustique, ERATO-09⁽⁴⁾, a été menée dans le golfe de Gascogne par le SHOM. Lors de la veille visuelle, la présence de dauphins communs *Delphinus delphis* a été notée. Dans cet article, nous évaluons a posteriori la faisabilité d'un monitoring par acoustique passive des interactions entre les émissions acoustiques de la campagne et les dauphins en utilisant deux hydrophones autonomes mouillés dans la zone d'expérimentation. Nous évaluons d'abord le supplément de niveau sonore induit par la campagne ERATO-09 en ces deux points de mesure. L'incrément est de 10 dB réf $1\mu\text{Pa}^2\text{Hz}^{-1}$ en moyenne et 30 dB réf $1\mu\text{Pa}^2\text{Hz}^{-1}$ au maximum par rapport au bruit ambiant. Afin d'évaluer l'impact éventuel des émissions acoustiques sur le comportement des dauphins (fuite, attraction, adaptation acoustique), nous avons développé un algorithme de détection de mammifères marins par acoustique passive. Cet algorithme permet de détecter les sifflements des dauphins communs dans un rayon de 1 kilomètre avec un taux de détection supérieur à 98 % référencé à une analyse visuelle du spectrogramme des mesures. Des statistiques de détection de sifflements ont été réalisées sur trois différentes phases de mesures utilisant des émissions actives. Compte tenu de la brièveté des événements et de la campagne, il n'a pas été possible de conclure quant à l'impact éventuel des émissions sur le comportement des dauphins. Cette étude montre néanmoins la faisabilité et l'intérêt d'un monitoring par acoustique passive des activités d'inversion géoacoustique et elle identifie des outils adaptés. Ce type d'étude devrait à l'avenir se généraliser afin de mutualiser les résultats et produire une étude statistique conséquente.

ABSTRACT

*In September 2009, during two days, a geo-acoustic experiment, named ERATO-09, was conducted by SHOM in the Bay of Biscay. During the experiment, the presence of common dolphins (*Delphinus delphis*) has been noticed. In this paper, we retrospectively evaluate the feasibility of passive acoustic monitoring to derive interactions between active acoustic scenarios and dolphin behaviour. Our study is based on measurements obtained by two autonomous hydrophones moored in the experimental area. We first evaluate the additional noise induced by the emissions in these two measurement points. The increment relative to ambient noise is 10 dB $1\mu\text{Pa}^2\text{Hz}^{-1}$ on average with peak values of 30 dB $1\mu\text{Pa}^2\text{Hz}^{-1}$. To assess the possible impact of acoustic emissions on dolphins behaviour (escape, attraction, vocal adjustment), we have developed a detection algorithm. This algorithm can detect whistles of common dolphins within a range of 1 km and with a detection success of 98%. Three active scenarios have been used to analyse the acoustic behaviour of dolphins in terms of whistle rates in relation to the power and type of anthropogenic sounds. The results do not show clear relationships between whistle activity and anthropogenic emissions. This is partly due to the scarcity of events that could be analysed and the short duration of the campaign. Nevertheless, this study shows the feasibility and interest of a passive acoustic monitoring system in conjunction with active experiments and identifies powerful analytical tools. This type of acoustic study should regularly be implemented in the future in order to consistently increase the data set for a more conclusive statistical analysis.*

⁽¹⁾ EA3876 et DTN, ENSIETA, 2 Rue François Verny, 29200 Brest, France. Contact : lucia.di_iorio@ensieta.fr, cedric.gervaise@ensieta.fr

⁽²⁾ SHOM, 13 Rue du Chatellier, CS 92803, 29228 Brest cedex 2, France

⁽³⁾ GIPSA-Lab, Université Stendhal, 38040 Grenoble Cedex 9

⁽⁴⁾ Evaluation Rapide de l'environnement Acoustique par Tomographie Océanique

1. INTRODUCTION

Le bruit anthropique introduit dans l'eau peut susciter des réponses plus ou moins importantes chez les cétacés (Richardson *et al.*, 2005). Les effets sévères portent sur des traumatismes physiques, la perte de l'audition, l'évitement d'un habitat sur le court ou le long terme ainsi que la fuite des animaux. Les effets plus doux portent sur des altérations physiologiques temporaires, des changements de comportement ou des réactions acoustiques, par exemple pour compenser l'interférence du bruit (Southall *et al.*, 2007 ; Clark *et al.*, 2009). Puisque le bruit peut être de différente nature, continu ou répétitif, impulsif ou non, plus ou moins intense, avec des énergies maximales concentrées autour de différentes bandes de fréquence, les réponses des animaux peuvent différer selon l'espèce concernée et le type de sources (Southall *et al.*, 2007).

Afin de limiter les effets nocifs des émissions acoustiques sur les mammifères marins, la plupart des expérimentateurs en acoustique sous-marine appliquent des règles de restrictions d'émission des sonars, généralement basées sur deux principes : d'une part la veille optique préalable et la montée graduelle des émissions acoustiques (procédure dite de "ramp up") et d'autre part la diminution de la puissance voire l'arrêt des émissions en cas de présence avérée de cétacés. Pour autant, il est très difficile de démontrer l'efficacité et même la pertinence de ce type de procédure de limitations des risques sans observations simultanées du comportement des mammifères en présence de cette gêne. Par conséquent, il serait intéressant de compiler systématiquement des données liant émissions acoustiques et comportements des cétacés pour peu que ceux-ci puissent être observés et caractérisés. Pour ce faire, une solution attrayante est de placer dans la zone d'expérimentation des hydrophones qui peuvent à la fois évaluer le chorus anthropique (les sons générés par l'expérimentateur) et le chorus biologique (la production sonore des mammifères marins). Le travail présenté dans cet article est une illustration de ce concept de monitoring passif. Il s'appuie sur l'analyse comparée des mesures réalisées lors d'une campagne d'océanographie acoustique, la campagne ERATO-09, conduite par le SHOM sur le plateau armoricain.

La campagne ERATO-09 avait pour but la caractérisation géoacoustique des fonds marins. Elle combinait pour cela l'utilisation d'un système de tomographie géoacoustique, un sondeur de sédiment et un sondeur multifaisceau. La veille visuelle a montré la présence régulière de dauphins communs *Delphinus delphis* dans la zone de travail. Pour limiter les interactions entre émissions acoustiques et mammifères marins, une procédure de restriction des émissions sonore (SHOM, 2009), a été mise en œuvre. Cette procédure prévoyait notamment un suivi visuel renforcé, des phases de "ramp up", une diminution des émissions en cas de présence lointaine avérée et un arrêt des émissions en cas de présence proche. Malgré ces mesures de limitations, de nombreux dauphins ont été observés sur la zone d'expérimentation. Ces dauphins ont donc été exposés à différents types de bruits anthropiques sous forme de sons modulés en très basse fréquence (source de tomographie géoacoustique) et des séries de signaux impulsifs avec des bandes de fré-

quence se chevauchant avec les vocalisations des dauphins (sondeurs). Afin d'évaluer un lien éventuel entre leur comportement et les facteurs de pression induite par les émissions sonores, deux enregistreurs de sons autonomes ont été posés sur le fond (points de mesure PAM : Passive Acoustic Monitoring) dans la zone. Le but de cet article est d'évaluer l'intérêt d'un tel monitoring en mettant en place des outils de traitement de vocalisations de cétacés, en expérimentant une étude d'impact consistant à rechercher les comportements de fuite ou d'attraction des mammifères marins lors de la mise en marche ou de l'arrêt des émissions actives, et en évaluant des adaptations possibles de la production sonore comme par exemple l'augmentation du taux de vocalisation pour contrer le masquage acoustique.

Dans la première partie, nous présentons la campagne ERATO-09. La deuxième partie évalue la puissance sonore introduite par la campagne aux deux points de mesure PAM. Dans la troisième partie, les mesures PAM sont utilisées pour caractériser les niveaux sonores produits par les dauphins communs. Dans la quatrième partie, nous proposons un algorithme de détection automatique que nous mettons en œuvre sur la campagne ERATO-09. La cinquième partie utilise les résultats du suivi PAM pendant la campagne pour évaluer l'impact des émissions acoustiques actives sur les dauphins. L'article s'achève par les conclusions et perspectives.

2. LA CAMPAGNE ERATO-09

La campagne ERATO-09, conduite par le Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM), s'est déroulée du 6 au 13 septembre 2009 dans le golfe de Gascogne sur le plateau continental (142 m de profondeur) à bord du N/O *L'Atalante*. L'objectif principal de la campagne était d'évaluer le fonctionnement d'un démonstrateur de système d'inversion géoacoustique (système STEREO). Les opérations à la mer ont consisté en deux types de travaux :

- le déploiement d'un système d'émission acoustique à très basses fréquences et de systèmes de réception (4 bouées dérivantes - bouées STEREO, une antenne mouillée sur le fond - bouée TELEMAQUE et deux enregistreurs acoustiques autonomes - AURAL M2),
- la réalisation de mesures d'imagerie acoustique et de structure des sédiments par sondeurs multifaisceaux et sondeur de sédiment.

Le tableau 1 présente les caractéristiques principales des équipements utilisés.

Le tableau 2 présente le calendrier des principales phases de la campagne ERATO-09 et identifie celles pour lesquelles le monitoring par acoustique passive a été réalisé.

Le monitoring par acoustique passive a été effectué pendant deux jours en continu et contient des enregistrements simultanés aux phases d'inversion géoacoustique et aux phases de levés au sonar bathymétrique et au sondeur de sédiment. La figure 1 présente les positions relatives des points de monitoring et du bâtiment émetteur durant les phases 3, 4, 5, 7 et 8.

SYSTÈMES D'ÉMISSION				
Modèle / caractéristiques	Bande des émissions (kHz)	Niveau d'émission dB (réf. $1 \mu Pa_{rms}^2 @ 1m$, ordre de grandeur)	Directivité	
STEREO	De 0.7 à 2.2	198 (max) 192 (nominal)	Omnidirectionnelle	
SMF	De 10 à 14	> 220	Verticale latérale	
SBP	De 1.8 à 5.2	> 220	Verticale	
SYSTÈMES DE RÉCEPTION				
Modèle	Nombre d'hydrophones	Bande d'écoute (kHz)	Fréquence d'échantillonnage (Hz)	Nombre de bits de quantification
STEREO	4	0.05 à 2	6 400	16
TELEMAQUE	6	0.05 à 2.2	8 192	16
AURAL	1	0.005 à 16	32 000	16

Tableau 1 : principales caractéristiques de l'instrumentation pour l'inversion géoacoustique.

Phase	Période (année 2009)		Monitoring par acoustique passive
	Début	Fin	
Phase 1 : transit et test	06 Septembre, 16 h	08 Septembre, 6 h	NON
Phase 2 : inversion géoacoustique 1	08 Septembre, 7 h	08 Septembre, 16 h	NON
Phase 3 : inversion géoacoustique 2	09 Septembre, 8 h	09 Septembre, 20 h	OUI
Phase 4 : inversion géoacoustique 3	10 Septembre, 6 h	10 Septembre, 20 h	OUI
Phase 5 : inversion géoacoustique 4	11 Septembre, 6 h	11 Septembre, 14 h	OUI
Phase 6 : multifaisceaux et sondeur	08 Septembre, 20 h	09 Septembre, 7 h	NON
Phase 7 : multifaisceaux et sondeur	09 Septembre, 20 h	10 Septembre, 6 h	OUI
Phase 8 : multifaisceaux et sondeur	10 Septembre, 20 h	11 Septembre, 6 h	OUI

Tableau 2 : principales phases de la campagne ERATO-09.

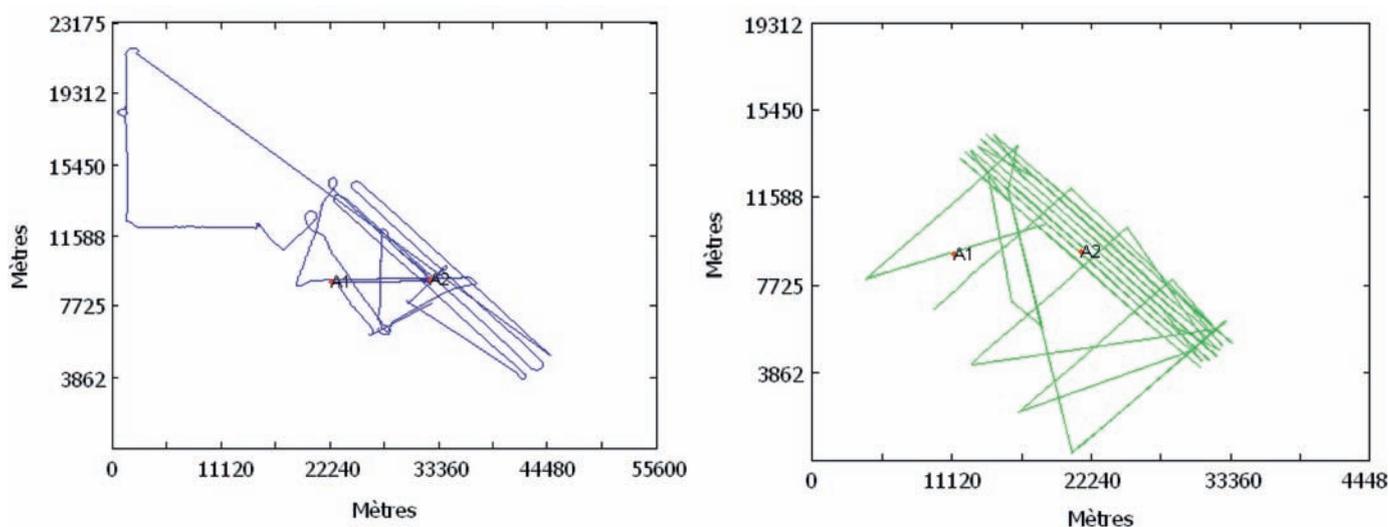


Figure 1 : Carte des phases d'ERATO-09 simultanées aux enregistrements PAM, à gauche les phases d'inversion géoacoustiques, à droite les phases de levés bathymétriques, les enregistreurs autonomes (PAM) sont repérés par les points A1 et A2.

3. ÉVALUATION DE LA PUISSANCE SONORE INTRODUITE PAR ERATO AUX POINTS DE MESURE PAM

Les deux points de mesure PAM ont été utilisés pour détecter la présence des dauphins dans leur voisinage et caractériser leur réponse acoustique aux émissions actives. Pour les deux points de mesure PAM, nous avons évalué les propriétés statistiques du bruit ambiant (terme qui conditionne le rayon de détection du système PAM) dans la zone d'expérimentation ainsi que le niveau sonore introduit par les émissions de la campagne ERATO-09 (terme qui potentiellement provoque une nuisance). Pour cela, à chaque instant de mesure, une fenêtre rectangulaire glissante d'une longueur de 2 048 échantillons a été appliquée à l'ensemble des enregistrements avec un taux de recouvrement de 50 %. Pour chaque position de fenêtre, une densité spectrale de puissance a été calculée par une méthode de périodogrammes. Ces réalisations successives de la densité spectrale de puissance ont été mises en mémoire pour finalement bâtir une courbe de densité de probabilité de cette densité spectrale de puissance. Ce traitement a permis d'obtenir la densité de probabilité en niveau NO en fonction de la fréquence. La figure 2 représente des extraits de cette analyse en choisissant une heure d'enregistrement autour des deux points de mesure PAM présentant des émissions géoacoustiques (phases 3, 4, 5) et des émissions du sondeur de sédiment et du sonar bathymétrique (phases 7, 8).

3.1 Niveau de bruit ambiant dans la bande d'émission des dauphins communs

Les quatre cartes de densité de probabilité présentent la même répartition des niveaux sonores mesurés. Les niveaux les plus probables correspondent au spectre du bruit ambiant dans la zone. A partir de 10 kilohertz, le niveau de bruit ambiant est approximativement constant égal à 50 dB réf. $1\mu\text{Pa}^2\text{Hz}^{-1}$.

3.2 Supplément du niveau de bruit introduit par l'inversion géoacoustique

Les cartes de densité de probabilité (panels a et b) correspondant à la présence d'émissions géoacoustiques présentent des niveaux probables s'écartant du pied de bruit entre 300 hertz et 2 kilohertz. Cette augmentation est la contribution des émissions géoacoustiques au bruit ambiant. En prolongeant les niveaux de bruit ambiant avant 300 hertz et après 2 kilohertz sur la bande comprise entre 300 hertz et 2 kilohertz, on obtient une estimée du bruit ambiant. En comparant ce niveau estimé à ceux mesurés, on montre que l'inversion géoacoustique apporte un supplément moyen de 10 dB et maximal de 30 dB par rapport au bruit ambiant.

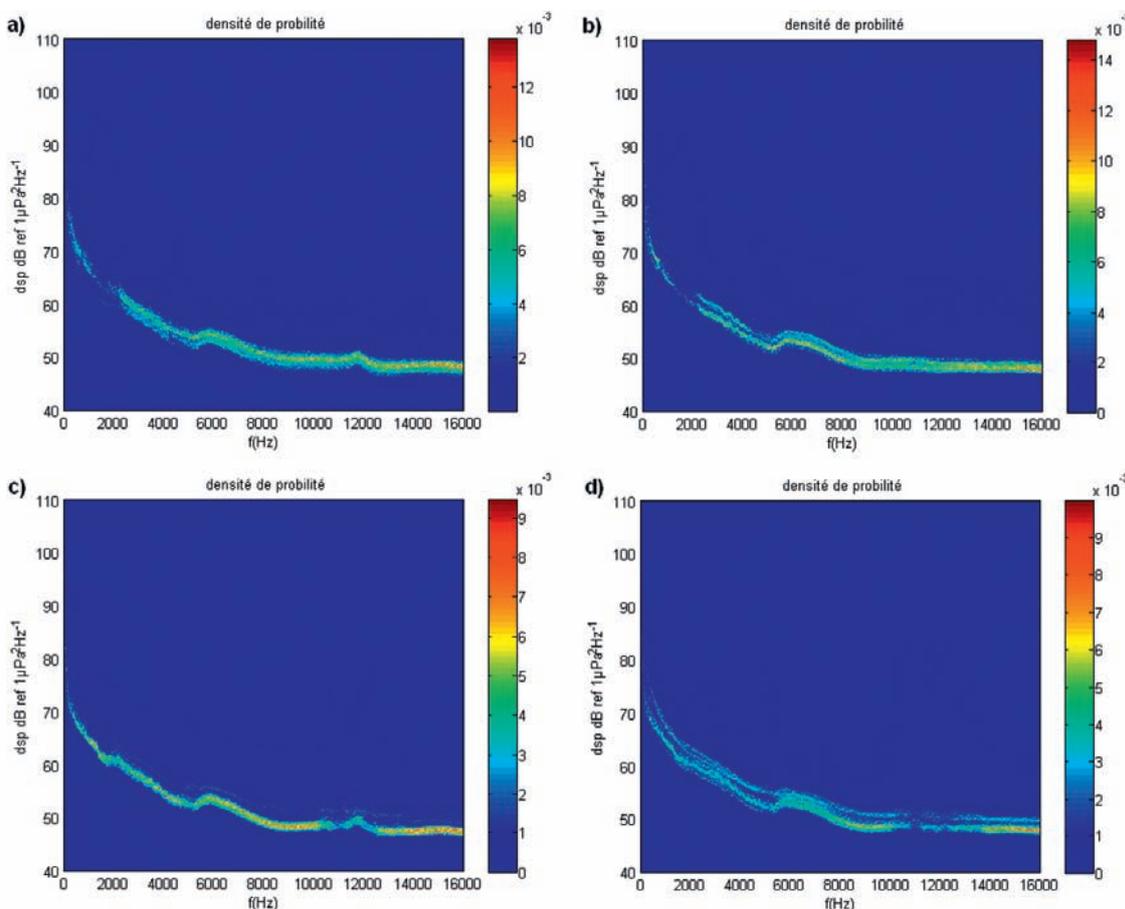


Figure 2 : Densités de probabilité des mesures passives lors des phases présentant des inversions géoacoustiques; a) AURAL 1, b) AURAL 2 et densité de probabilité des périodes de levé bathymétrique (SMF et SBP) pour c) l' AURAL 1 et d) l' AURAL 2.

3.3 Supplément du niveau de bruit introduit par le sondeur multifaisceau

Les cartes de densité de probabilité (figure 2, panels c et d) correspondant à la présence d'émissions du sondeur multifaisceau présentent des niveaux probables s'écartant du pied de bruit entre 10 kilohertz et 14 kilohertz. Cette augmentation est la contribution des émissions sonar au bruit ambiant. En prolongeant les niveaux de bruit ambiant avant 10 kilohertz et après 14 kilohertz sur la bande comprise entre 10 kilohertz et 14 kilohertz, on obtient une estimée du bruit ambiant. En comparant cette estimée aux niveaux mesurés, on montre que le sondeur bathymétrique apporte un supplément moyen de 10 dB et maximal de 40 dB par rapport au bruit ambiant.

4. ÉVALUATION ET CARACTÉRISATION DE LA PRODUCTION SONORE DES DAUPHINS COMMUNS AUX POINTS DE MESURE PAM

L'étape suivante de notre étude est de caractériser la production sonore des dauphins à partir des enregistrements. Les algorithmes de détection que l'on va utiliser sont basés sur l'utilisation de spectrogrammes (Gervaise *et al.*, 2010). La pente des lois de modulation des sifflements et leur niveau émis conditionnent les performances de ces algorithmes. Dans un premier temps, nous avons estimé ces caractéristiques à partir des données enregistrées par les deux points de mesure PAM. Pour cela, nous avons parcouru les enregistrements et sélectionné une série de 70 vocalises de dauphins présentant nettement 3 échos relatifs à trois trajets de propagation distincts (trajet direct, trajet réfléchi surface et trajet réfléchi fond). Pour chaque vocalise de ce type, la bande fréquentielle et la durée sont relevées et la puissance moyenne reçue est calculée. La position du dauphin émettant est estimée à partir des temps de trajet des 3 échos en supposant une propagation dans une colonne d'eau isocélère (Au *et al.*, 2008). La puissance moyenne émise à un mètre est alors reconstruite à partir de la puissance moyenne reçue en la corrigeant des pertes de transmission sphérique calculées grâce à la position estimée de la source. Le tableau 3 présente les propriétés des vocalises sélectionnées.

5. DÉTECTION AUTOMATIQUE DE LA PRÉSENCE DE MAMMIFÈRES MARINS PAR PROCÉDÉS PAM

Il existe de nombreux outils et méthodes disponibles pour détecter les mammifères marins à partir d'enregistreurs autonomes. Comme nos enregistreurs sont limités à une fré-

quence d'échantillonnage de 32 768 hertz, seuls les sifflements sont mesurables. En suivant les tendances de la communauté, nous avons développé une chaîne de traitement nommée "BioSound - ENSIETA". Pour détecter ces sifflements, nous formons le spectrogramme des mesures, ce qui permet d'en améliorer le rapport signal à bruit et de représenter celles-ci dans un espace apte à reconnaître les modulations de fréquence caractéristiques des sifflements. D'autre part, le spectrogramme est à ce jour le seul outil permettant des applications temps réel. Au sein de ce spectrogramme, les pixels statistiquement plus énergétiques que leurs voisins sont sélectionnés et au sein de cet ensemble, ceux organisés en modulation de fréquence sont retenus. Finalement, tout en gardant en mémoire l'intégralité des pixels temps - fréquence retenus, ces derniers sont exprimés en une seule quantité : une métrique résumant l'activité acoustique des animaux. Parmi un large choix de métriques, nous avons retenu le taux de couverture temporelle défini comme la proportion de temps couverte par des sifflements pendant une période donnée. Pour cette étude, nous avons retenu une période de référence de 20 secondes. La figure 3 présente des exemples de sorties de nos outils appliqués aux données ERATO-09.

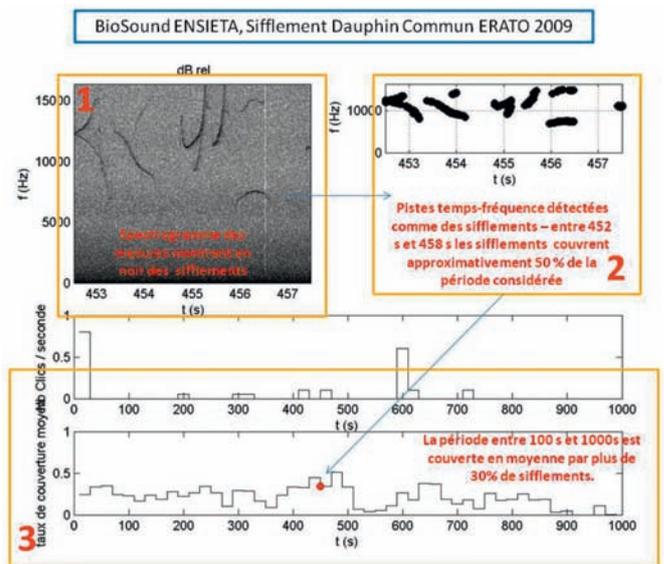


Figure 3 : Exemple de sortie de notre algorithme de détection des sifflements.

En complément de cette phase de détection, nous avons déterminé la portée de détection des PAM par l'application de l'équation du SONAR passif :

$$SL + TL(R) + GT - NL > SD,$$

équation que l'on détaille dans la suite.

Propriétés	Valeur moyenne	Ecart type
Niveau émis (dB réf 1µPa rms@ 1m)	142	8
Durée (s)	0.34	0.17
Bande (Hz)	5 400	1 600
Pente modulation (Hz/s)	20 200	13 200

Tableau 3 : caractéristiques principales des vocalises de dauphins durant la campagne ERATO-09.

- Le terme *SD* est un seuil de détection et correspond au point de fonctionnement au-delà duquel notre détecteur ne fonctionne plus ou au delà duquel la métrique acoustique extraite n'est plus fiable. Ce point de fonctionnement correspond à détecter dans le spectrogramme 50 % des pixels appartenant effectivement à un sifflement tout en ajoutant au maximum 10 % de fausses alarmes. Ce point de fonctionnement est obtenu pour un rapport signal à bruit après formation du spectrogramme supérieur ou égal à 9 dB.
- Le terme *GT* correspond au gain de traitement. En choisissant une longueur de fenêtre FFT adaptée à la pente moyenne des vocalises, soit 100 millisecondes, on trouve le gain de traitement induit par le calcul du spectrogramme égal à 17 dB.
- Le terme *SL* est le niveau émis, soit 142 dB dans notre cas.
- Enfin, le terme *NL* est le niveau de bruit, égal à la densité spectrale de bruit exprimée en dB plus 10 fois le logarithme en base 10 de la bande du sifflement ($50+10\log(5\ 400)$) soit 87 dB.

Au bilan, on arrive aux pertes de transmission admissibles $TL(R)>-61$ soit une portée de 1 000 mètres sous l'hypothèse conservatrice des pertes sphériques.

Suite à l'application de nos outils sur la totalité des enregistrements réalisés durant ERATO-09, nous avons évalué les performances en termes de probabilité de détection et de fausse alarme en confrontant les résultats de détection et les signaux réels. Dix fenêtres d'une durée totale d'une heure ont été choisies dans la base. Les critères de sélection sont la présence ou l'absence d'activité anthropique dans les données acoustiques ainsi que la présence ou l'absence de sifflements détectés par *BioSound*. Ceci permet entre autre de vérifier l'influence sur la détection de sources acoustiques autres que les sifflements. Dans chaque fenêtre d'une heure, une minute a été validée visuellement toutes les 10 minutes. La minute de traitement a été visualisée par pas de 0.8 secondes, ce qui correspond à une durée moyenne de sifflement. Une comparaison entre la présence ou absence d'un sifflement entre le spectrogramme (données réelles) et la fenêtre de détection (figure 3) a été fait pour tous les pas de 0.8 secondes. Ceci a permis d'obtenir les fausses détections et les sifflements manqués. Le taux de succès de *BioSound* a ainsi pu être calculé et représenté pour chaque "état acoustique" (émission géoacoustique, levé bathymétrique, absence d'émissions actives). Le Tableau 4 présente les résultats de l'analyse de performances du détecteur.

Etat acoustique	Faux positifs * (%)	Faux négatifs ** (%)	Taux de succès <i>BioSound</i> (%)
Absence d'émissions actives (N = 2 750)	0	2.1	97.9
Emissions géoacoustiques (N = 875)	0.24	0.24	99.52
Levé bathymétrique (N = 875)	27.6	0	72.4

* Faux positifs : fausses détections

** Faux négatifs : sifflements manqués par *BioSound*

Tableau 4 : Résultats de l'étude des performances de détection des sifflements par *BioSound* par gamme d'état acoustique, performances évaluées à partir de N périodes de 0.8 s.

La figure 4 présente les résultats de la détection pour l'hydrophone 1. On fait apparaître avec un "D" les vrais positifs correspondant à la détection des sifflements et avec un "MF-S" les faux positifs correspondant aux détections des signaux de sondeurs de sédiments et de sonars bathymétriques.

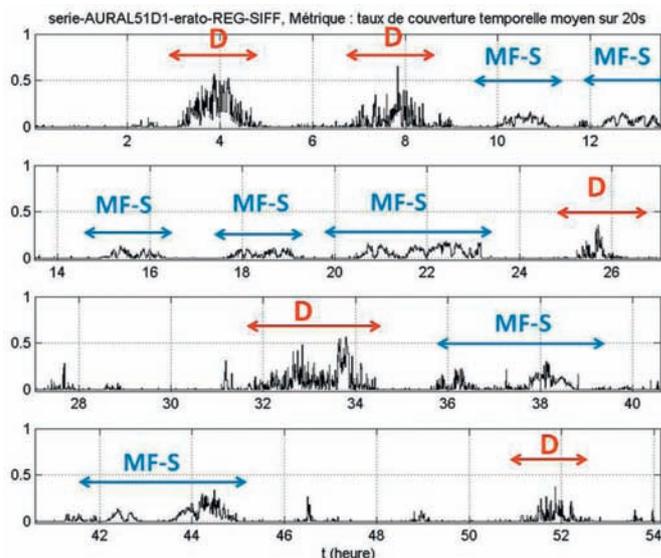


Figure 4 : Résultat de l'algorithme de détection des sifflements appliqué sur 54 heures d'enregistrement durant ERATO-09.

Notre outil de détection est performant pour la détection des sifflements mais doit être complété par une étape de réjection des faux positifs dus aux émissions des sondeurs de sédiment et des sondeurs bathymétriques. Ces émissions provenant de sondeurs ont un contenu temps - fréquence bien calibré et stable dans le temps, nous avons utilisé ce fait pour définir des gabarits typiques de ces émissions que nous avons alors recherchés dans le spectrogramme de nos mesures. La date des présences de ces gabarits au sein du spectrogramme a été mise en mémoire et en ces dates, nous avons interdit toute détection de sifflements. Cette méthode de réjection a permis d'éliminer la grande majorité des faux positifs. Cette recherche automatique de gabarit dans l'espace temps - fréquence a été réalisée avec l'outil XBAT (www.xbat.org, Figueroa *et al.*, 2008).

6. RECHERCHE D'IMPACT DE LA CAMPAGNE ERATO SUR LES MAMMIFÈRES À PARTIR DES OUTILS PAM

6.1 Impact potentiel des émissions acoustiques.

Pendant le temps d'enregistrement des AURAL, trois phases d'inversion géoacoustique ont été "monitorées", avec des durées d'émission respectivement de 5 heures, 4 heures 20 minutes et 2 heures (figure 5a). En raison du manque d'observations visuelles des dauphins communs autour des AURAL, le nombre d'animaux était inconnu et leur présence est uniquement déterminée par la détection de vocalisations sur les enregistrements. Pour évaluer si les émissions acoustiques ont une influence sur le comportement vocal des dauphins communs, les taux de sifflements calculés pour toute période d'analyse de 20 secondes incluse dans les 30 premières minutes de chaque série d'émission ont été comparés aux taux de sifflements des périodes incluses dans les 30 minutes précédentes, sans émissions actives (*début*). Le même principe a été appliqué pour les 30 dernières minutes de chaque série d'émissions suivies par 30 minutes où les émissions ont été stoppées (*fin*) (figure 5a). Ce plan de comparaison de périodes sans et avec émissions acoustiques a été choisi pour éviter un effet sur le taux de sifflements dû à la densité de dauphins présents. En fait, puisque les passages de dauphins dans la zone de détection acoustique des AURAL duraient environ deux heures (figure 5), il est présumé que les sifflements enregistrés à chaque AURAL pendant une heure (paires de 30 minutes avec et sans émission) provenaient du même groupe de dauphins. Les analyses statistiques ont été faites en regroupant les trois *débuts* des deux AURAL ainsi que les trois *fins*. Le regroupement des deux AURAL dans une même analyse est justifié par le fait qu'un groupe de dauphins ne pouvait pas être détecté sur les deux capteurs en même temps, le rayon de détection de sifflements des AURAL (autour de 1 000 m)

étant nettement inférieur à la distance entre les AURAL – environ 7 000 mètres) et que les taux de sifflements étaient donc indépendants.

Le modèle statistique utilisé pour étudier l'effet des émissions acoustiques sur la production de sifflements est un modèle linéaire général (MLG) avec distribution de quasi-Poisson incluant les interactions entre le taux de sifflements, les séries d'émissions et les AURAL. Les modèles ont été implémentés dans le programme R (version 2.10.0, The Foundation for Statistical Computing 2009).

Les analyses des débuts des séries de "pings" montrent que les dauphins vocalisaient plus dans les 30 min avant l'activation des émissions que pendant (MLG : N = 1 091, d.f. = 1 084, $\chi^2 = -2.11$, P = 0.03). Cet effet était surtout visible sur l'AURAL 1 (MLG : N = 1 091, d.f. = 1 084, $\chi^2 = -1.86$, P = 0.06) (figure 6a). Aucune des interactions était significative (émission acoustique (oui/non) * série de "pings" : $\chi^2 = 1.1$, P = 0.28 ; série de "pings" * AURAL : $\chi^2 = -1.4$, P = 0.16 ; AURAL * Emission acoustique : $\chi^2 = 1.78$, P = 0.08). Il faut quand même remarquer que la première phase d'inversion géoacoustique influence majoritairement les résultats (figure 6b). Les analyses des fins des séries de "pings" montrent que les dauphins vocalisaient plus dans les 30 min suivant la fin des émissions que pendant (MLG : N = 1 044, d.f. = 1 037, $\chi^2 = 2.75$, P = 0.006). L'interaction entre "émission acoustique" (oui/non) et AURAL était significative ($\chi^2 = -2.08$, P = 0.04), ce qui montre une différence entre les AURAL et un résultat fortement influencé par les données de l'AURAL 2 (figure 6c). Malgré juste une tendance à un effet de l'interaction des séries de "pings" avec les AURAL ($\chi^2 = 1.91$, P = 0.06) et aucun effet avec l'émission acoustique ($\chi^2 = -1.7$, P = 0.09), il est évident que c'est la troisième série de "pings" de l'AURAL 2 qui a principalement déterminé ces résultats (Figure 6d).

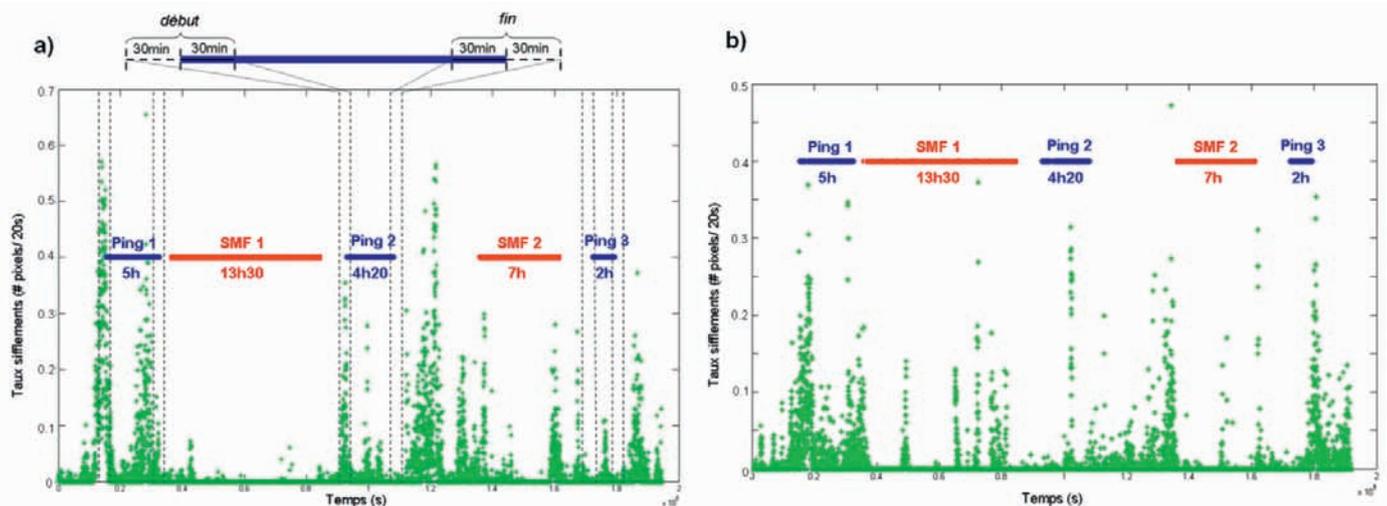


Figure 5 : Illustration des taux de sifflements pendant toute la période d'enregistrement pour l'AURAL 1 (a) et l'AURAL 2 (b). Les pics verts correspondent aux détections de sifflement au passage des dauphins dans la zone de détection. La durée des pics est d'environ 2 h. En bleu, les séries d'émissions acoustiques, en rouge les séries de levés bathymétriques. L'insertion en haut dans a) illustre le choix des six blocs d'une heure (lignes pointillées) choisi pour les analyses des phases d'inversions géoacoustiques ; *début* : 30 min avant le début des émissions (ping) combinés aux 30 min adjacentes pendant les séries de "pings" ; *fin* : 30 min à la fin des séries de "pings" suivies par 30 min après l'arrêt des émissions de "pings".

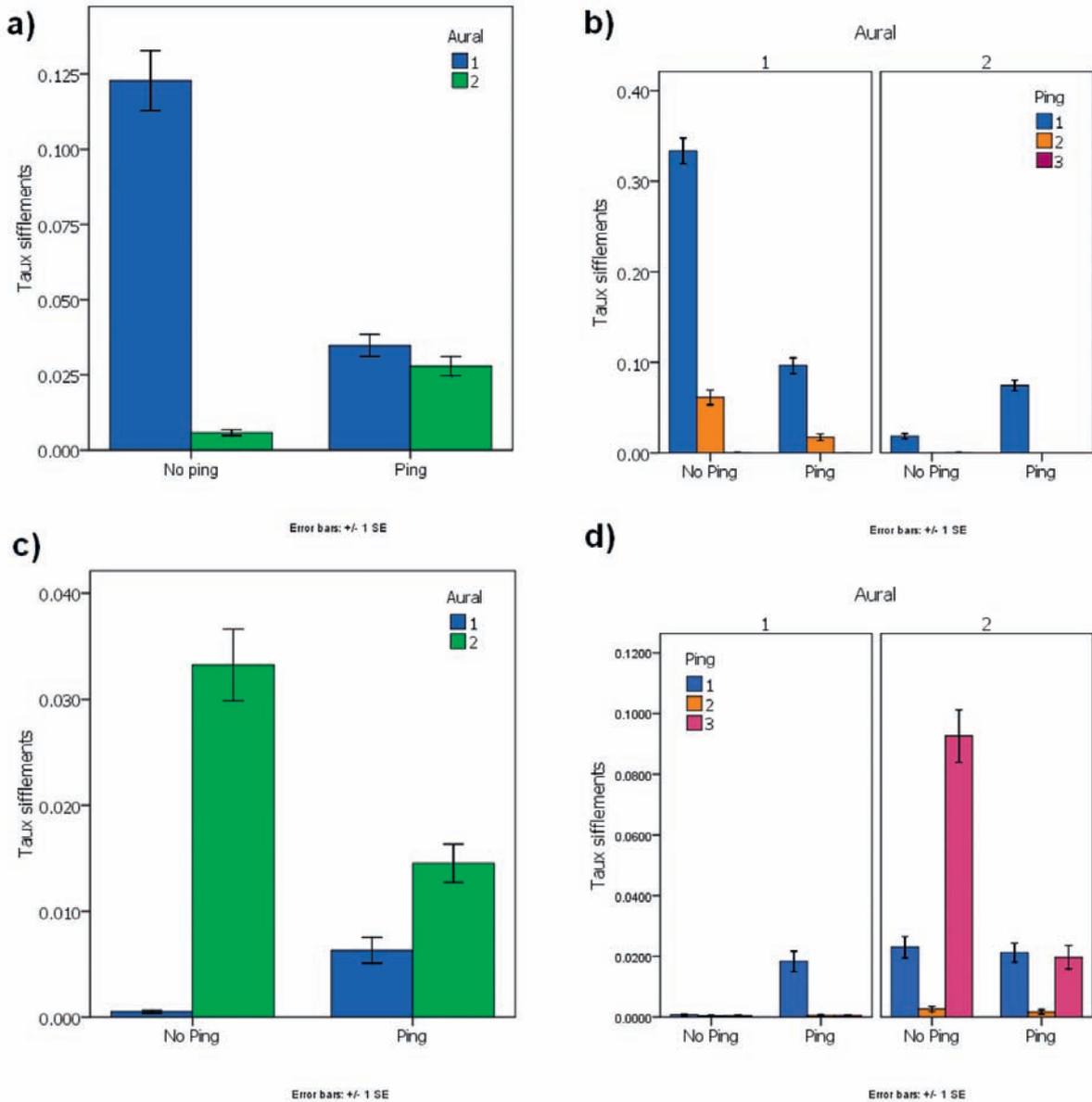


Figure 6 : Illustration des résultats du taux de sifflement en fonction des "pings = émissions géoacoustiques" pour chaque AURAL. a) et b) indiquent les résultats pour les analyses des *débuts*, c) et d) ceux des *fin*s. Dans a) et c) les taux de sifflements des analyses des trois séries de "pings" sont cumulés, tandis que dans b) et d) les contributions de chaque série de "pings" sont illustrées séparément (3 couleurs).

6.2 Impact potentiel du levé bathymétrique

Pendant le temps d'enregistrement des AURAL, deux levés bathymétriques ont été effectués avec des émissions d'impulsions continues, détectables sur les AURAL pendant environ 13 heures 30 et 7 heures respectivement. (figure 5a). Ces levés ont été effectués tard le soir et la nuit. Puisque dans le cas du SMF il s'agit d'une source acoustique très directionnelle, les niveaux reçus aux capteurs variaient fortement en fonction de la position relative du navire. Ces variations concernaient non seulement l'intensité du signal reçu, mais aussi la bande de fréquence d'énergie maximale. Une analyse comparant des périodes sans et avec impulsions comme dans le cas des phases d'inversions géoacoustiques n'était donc pas possible. Dans ce papier, les analyses par rapport au SMF se réduisent uniquement à des représenta-

tions graphiques des taux de sifflements durant ces phases.

La comparaison des taux de sifflements sur l'ensemble des enregistrements, indique que les périodes des levés bathymétriques étaient celles avec la moindre activité vocale, ce qui était vrai pour les deux capteurs, l'AURAL 2 en particulier (figure 7). Les densités de probabilité des spectres des niveaux acoustiques des périodes des levés (figure 2c et d) montrent quelques différences entre les deux capteurs. Sur l'AURAL 2, la probabilité d'avoir de l'énergie dans la bande de fréquence de 2 kHz à 5 kHz et surtout de 10 à 14 kHz est supérieure à celle de l'AURAL 1. Cela concorde avec la trajectoire du bateau qui, pendant les levés, se tenait plus proche de l'AURAL 2 que de l'AURAL 1 (figure 1).

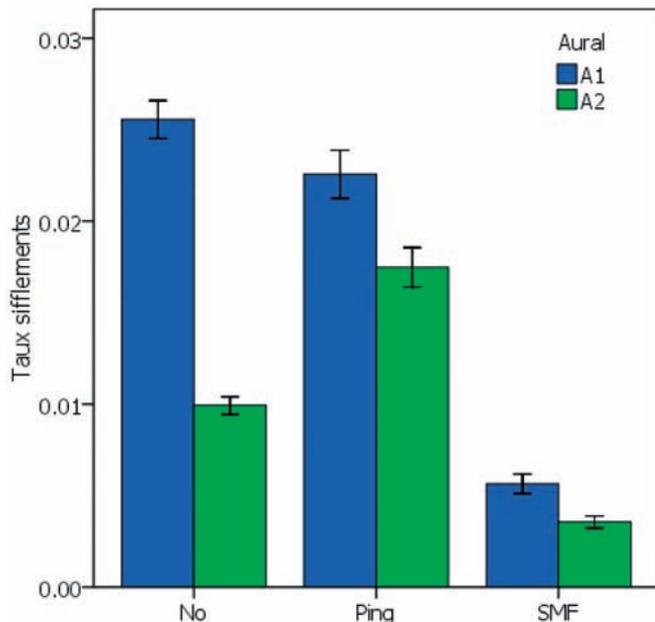


Figure 7 : Illustration des taux de sifflement pour l'ensemble des enregistrements pour les deux AURAL. No = pas d'émission anthropique, "Ping" = émissions POISSON, SMF = émissions sondeur multifaisceau et sondeur de sédiment.

7. DISCUSSION

Les dauphins étaient présents et vocalement actifs pendant tout le temps d'enregistrement. En raison du manque de données acoustiques dans la même zone en absence des activités d'ERATO, une comparaison avec les conditions naturelles n'était pas possible. Cependant, la présence de dauphins tout le long de la campagne indique que les émissions d'ERATO n'ont pas provoqué de réactions drastiques, comme l'évitement de la zone pendant la durée de la mission. C'est aussi attesté par les fréquentes approches des dauphins du bateau, observés sporadiquement par les membres de l'équipage, même pendant les émissions acoustiques (Stéphan, Josso & Kinda, communication personnelle).

Pour l'évaluation de l'impact de la campagne ERATO-09 sur la communication vocale des dauphins, les analyses ont été faites en fonction de deux sources acoustiques avec des caractéristiques très différentes, les émissions pour l'inversion géoacoustique et les sondeurs et sonars bathymétriques. Le comportement vocal par rapport aux séries de "pings" utilisés pour l'inversion géoacoustique a révélé que les dauphins sifflaient davantage juste avant le début et après la fin des séries de "pings" de basse fréquence. Ce résultat pourrait indiquer une diminution de communication sociale pendant la période des émissions. Cependant, le comportement vocal différait entre les capteurs, et les analyses étaient fortement influencées par deux événements seulement, un pour chaque capteur. En considérant la carence d'événements statistiques (six en tout) et le manque d'observations comportementales visées des dauphins présents dans la zone d'enregistrement, il est impossible d'extraire des conclusions définitives. Par exemple, le pic de vocalisations juste avant le début des émissions pourrait être dû au passage du navire (sans émissions) dans la zone des

dauphins qui a provoqué une augmentation de sifflements. Par ailleurs, la diminution de vocalisations juste après ce pic pourrait indiquer que les dauphins ont quitté la zone de détection du capteur et n'ont pas nécessairement cessé de vocaliser. Pour valider les résultats obtenus, il est donc indispensable d'agrandir la base de données et d'inclure un protocole d'observation visuelle des dauphins surtout aux passages sur les capteurs acoustiques, avec et sans émission acoustiques.

Quant aux observations de la communication vocale en fonction des levés bathymétriques, une diminution nette de la production de sifflements a été enregistrée pendant toute la durée des émissions SMF sur les deux capteurs. Cette diminution n'était pas nécessairement due à une absence de dauphins car des longs bouts de clics d'écholocation ont été enregistrés (données non publiées). Contrairement aux fréquences basses des "pings" pour la géoacoustique, les impulsions du SMF pourraient interférer directement avec la communication sociale des dauphins à cause du chevauchement de la bande de fréquence des impulsions avec celle des sifflements. Par conséquent, les vocalisations pourraient être masquées. Une diminution, voir une cessation de vocalisations en réponse au masquage, a été décrit pour différentes espèces de cétacés (i.e. Gordon *et al.*, 2004). Le masquage implique une forte réduction de l'espace de communication des animaux (Clark *et al.*, 2009). Bien qu'une forte diminution des taux de sifflements ait été observée dans cette étude, les données disponibles ne permettent pas une évaluation de l'hypothèse de masquage. Tenant compte de la variabilité des niveaux des impulsions du SMF reçus aux capteurs, il serait nécessaire d'inclure ces niveaux dans les analyses, afin d'évaluer une possible corrélation entre le changement d'activité vocale et l'intensité de l'interférence acoustique due au SMF. Puisque les levés bathymétriques ont été effectués pendant la nuit, la diminution des sifflements pouvait être aussi liée à des comportements nocturnes naturels, comme la chasse. En fait, les dauphins communs sont connus pour se nourrir principalement pendant la nuit (Pusineri *et al.*, 2007, Brophy *et al.*, 2009, Evans, 1994). Pour une étude adéquate de l'impact du SMF sur la communication sociale des dauphins communs, il serait nécessaire d'effectuer des enregistrements nocturnes sous des conditions naturelles dans la même zone et de dérouler les levés bathymétriques avec des observations visuel-acoustiques des dauphins aussi pendant le jour.

8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Une série d'outils a été présentée et mise en œuvre pour réaliser une étude d'impact par acoustique passive d'une mission d'inversion géoacoustique dans le golfe de Gascogne sur des dauphins communs présents lors de la mission. Pour cela deux hydrophones autonomes ont été mouillés, leurs mesures ont été analysées par un algorithme de détection qui procure un rayon de détection de 1 kilomètre autour du point d'ancrage. L'analyse de l'impact potentiel a été réalisée en comparant les taux de détections avant et après la mise en route ou l'arrêt des sources actives. Les outils se sont montrés efficaces et ces derniers ainsi que la méthodologie d'analyse proposée peuvent servir de canevas à un protocole à mettre en œuvre régulière-

ment. Cependant la durée d'observation de la campagne a généré uniquement 6 évènements analysables dont il est difficile de tirer des conclusions. Dans cette optique, il serait intéressant de multiplier ces études et d'en mutualiser les résultats afin d'en extraire un impact ou pas.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la Direction générale de l'armement (DGA, France) pour le financement de cette étude via le PEA ERATO (contrat de recherche SHOM-ENSIETA 07CR001).

BIBLIOGRAPHIE

AU W. W. L., HASTINGS M. C., 2008: "Principles of marine bioacoustics". *Modern Acoustics and Signal Processing Series* (Springer, DOI: 10.1007/978-0-387-78365-9).

BROPHY J. T., MURPHY S. & ROGAN E., 2009: "The diet and feeding ecology of the short-beaked common dolphin (*Delphinus delphis*) in the northeast Atlantic". *Report to the Scientific Committee of the International Whaling Commission* (SC/61/SM 14, pp. 1-18).

CLARK C. W., ELLISON W. T., SOUTHALL B. L., HATCH L., VAN PARIJS S. M., FRANKEL A. & PONIRAKIS D., 2009: "Acoustic masking in marine ecosystems: intuitions, analysis and implication". *Marine Ecology Progress Series* (vol. 395, pp. 201-222).

EVANS W. E., 1994: "Common dolphin, white-bellied porpoise *Delphinus delphis* Linnaeus", 1758. *Handbook of Marine Mammals* (Ed. by RIDGEWAY S. H. & HARRISON S. R. pp. 191-224, London, UK, Academic Press).

FIGUEROA H. & ROBBINS M., 2008: "XBAT: An Open-Source Extensible Platform for Bioacoustic Research and Monitoring". Conference "Computational bioacoustics for assessing biodiversity". *Proceedings of the International Expert meeting on IT-based detection of bioacoustical patterns* (http://www.biodiv-chm.de/Konvention/F10052472515/Documents/Skript234_Bioacoustic December 7th, 10th 2007 at the International Academy for Nature Conservation (INA), Isle of Vilm, Germany).

GERVAISE C., SIMARD Y., IOANA C., BUSSON S., ANDRÉ M., 2010 : "Une méthode pour évaluer et optimiser les performances des détecteurs de mammifères marins par acoustique passive" (accepté pour publication). *Revue Acoustique et Techniques*.

GORDON J., GILLESPIE D., POTTER J., FRANTZIS A., SIMMONDS M. P., SWIFT R. & THOMPSON D., 2004: "A Review of the effects of seismic surveys on marine mammals". *Marine Technology Society Journal*, (vol. 37, pp. 16-34).

RICHARDSON J. W., GREENE Jr. C. R., MALME C. I. & THOMSON D. H., 1995. *Marine Mammals and Noise* (Academic Press, San Diego, California, USA).

PUSINERI C., MAGNIN V., MEYNIER L., SPITZ J., HASSANI S. & RIDOUX V., 2007: "Food and feeding ecology of the common dolphin (*Delphinus delphis*) in the oceanic northeast Atlantic and comparison with its diet in neritic areas". *Marine Mammal Science* (vol. 23, pp 30-47).

SHOM : *Instructions techniques de la campagne ERATO-09* (N° 144 SHOM/DO/MIP/DTI/NP, annexe A, 2009).

SOUTHALL B. L., BOWLES A. E., ELLISON W. T., FINNERAN J. J., GENTRY R. L., GREENE Jr. C. R., KASTAK D., KETTEN D. R., MILLER J. H., NACHTIGALL P. E., RICHARDSON J. W., THOMAS J. A. & TYACK P. L. 2007: "Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations". *Aquatic Mammals* (vol. 33, pp. 411-521).

DÉTECTION DES CLICS DE BALEINES À BEC

par Odile Gérard (1)*, Craig Carthel (2) et Stefano Coraluppi (2)

RÉSUMÉ

Cet article décrit des algorithmes de détection et de classification de clics de baleines à bec. Un détecteur de transitoires, basé sur le test de Page, est utilisé pour détecter des clics. La classification, en deux étapes, se fait d'abord sur chaque clic puis sur l'intervalle inter-clics, paramètre caractéristique des clics de baleines à bec. Dans cette seconde étape, l'association des clics au cours du temps est faite par l'intermédiaire d'un algorithme de pistage qui repose sur une hypothèse de variation lente des amplitudes et de l'intervalle entre clics. Les résultats de la méthode sur des enregistrements de mammifères marins sont présentés. Les résultats sur les enregistrements de baleines à bec de Blainville sont très prometteurs. Par contre, des développements complémentaires concernant les baleines à bec de Cuvier sont encore nécessaires.

ABSTRACT

This article describes algorithms for the detection and classification of beaked whale clicks. A transient detector based on the Page test is used to detect clicks. The classification is done in two stages, the first one on the individual click, the second one on the Inter-Click Intervals (ICI) which are typical for beaked whale. For this second stage, clicks are associated using a feature-aided multi-hypothesis tracking algorithm. The association is based on the assumptions of slowly-varying click amplitudes and inter-click intervals. The article includes a description of the method as well as experimental results and recent enhancements. The results on the Blainville's beaked whale clicks are promising. Cuvier's beaked whale clicks are more challenging. In addition we found out that the recordings used for this study have some technical problems; thus, further work is required, on a dataset of better quality.

(1) DGA Techniques Navales, avenue de la Tour Royale, BP 40915, 83050 Toulon Cedex, France
E-mail: odile.gerard@dga.defense.gouv.fr,

(2) NATO Undersea Research Centre, Viale S. Bartolomeo 400, 19126 La Spezia, Italy

* Ce travail a été réalisé lorsque l'auteur était au NATO Undersea Research Centre

1. INTRODUCTION

A plusieurs reprises, lors d'exercices SONAR, des mammifères marins et tout particulièrement des baleines à bec, ont été retrouvés échoués [1-3]. Il est donc souhaitable d'éviter de faire des exercices d'entraînement SONAR en leur présence, ce qui pose le problème de leur détection. L'ouïe est leur sens privilégié, et ils émettent régulièrement différentes sortes de sons. L'écoute passive est donc un bon moyen de pouvoir détecter leur présence. Les émissions des cétacés à fanons sont généralement des chants. Les émissions des cétacés à dents se divisent en trois grandes catégories : sifflements, cris pulsés et clics. Notre attention se focalisera en premier lieu sur les baleines à bec car elles sont très nettement les plus sensibles. Trois espèces de baleines à bec peuvent être trouvées au large des côtes françaises : la baleine de Cuvier (*Ziphius cavirostris*), le mésoplodon de Blainville (*Mesoplodon densirostris*) et le mésoplodon de Sowerby (*Mesoplodon bidens*). La première espèce se trouve aussi bien en Méditerranée qu'en Atlantique et les deux espèces de mésoplodon ne se trouvent que dans l'Atlantique. Les sons émis par les mésoplodons de Sowerby sont peu connus à ce jour, et nous n'en n'avons pas à notre disposition. Dans cet article nous nous intéressons donc aux baleines de Cuvier et aux mésoplodons de Blainville. Le paragraphe 2 présente les sons émis par les espèces étudiées, le paragraphe 3 présente les enregistrements utilisés pour cette étude. Le paragraphe 4 donne une présentation de la méthode. Le paragraphe 5 donne les résultats obtenus sur les enregistrements de mésoplodons de Blainville et les propriétés intéressantes découvertes pour les clics de "buzz". Dans le paragraphe 6, une ébauche de résultats est donnée pour les baleines de Cuvier, et les difficultés rencontrées pour cette espèce sont exposées. Les conclusions et perspectives sont données dans le paragraphe 7.

2. SONS ÉMIS PAR LES ESPÈCES ÉTUDIÉES

Les baleines à bec passent la majorité de leur temps sous l'eau, ce qui les rend difficiles à observer. De plus, quand elles sont à la surface, leur souffle est inexistant ou très faible (cela dépend des conditions météorologiques), elles sont plus timides que les dauphins et vont rarement à la rencontre des bateaux. Elles font partie des espèces qui atteignent les plus grandes profondeurs, elles plongent couramment à plus de 1 000 m pour se nourrir pour une durée qui atteint facilement 45 min ; elles commencent à cliquer dès qu'elles ont atteint une certaine profondeur (à partir de 200 m) [4-5]. Quand elles ne se nourrissent pas, elles passent quand même la majorité de leur temps à une profondeur intermédiaire et sont quasiment silencieuses [4].

Pour trouver leur nourriture, les cétacés à dents émettent des clics (appelés clics d'écholocalisation). Certaines espèces, dont notamment les baleines à bec, sont connues pour émettre ces clics de façon régulière. Le temps qui sépare deux clics est appelé ICI (Inter-Click Interval). Une séquence de clics réguliers peut être suivie d'une pause ou d'une séquence de clics dont le rythme est très accéléré, appelé

"buzz", correspondant au moment de capture de la proie. La période d'écholocalisation peut donc être divisée en deux phases, la période de recherche de la nourriture, pour laquelle les clics sont émis de façon régulière et la période de capture, pour laquelle les clics sont émis de façon très accélérée. La période de recherche est beaucoup plus longue que la période de capture. Les clics ont la propriété d'être très directifs aussi bien dans le sens horizontal que vertical [6]. La directivité des clics d'animaux captifs est donnée dans [6]. Les animaux ont un axe d'émission privilégié suivant lequel les signaux émis ont un niveau maximal. Il peut exister une forte variabilité des signaux en fonction de l'axe d'émission. En plus d'une grande différence d'amplitude, il existe aussi une grande différence sur les formes temporelle et fréquentielle des clics, qui peuvent subir des réflexions à l'intérieur du crane et, en conséquence, entraîner des creux et des pics dans le spectre d'émission [6].

Les baleines à bec étudiées sont connues pour n'émettre que des clics [7-9] bien que cette affirmation soit contestée [10], un sifflement et trois cris pulsés ayant été enregistrés en présence de mésoplodons de Blainville. La détection et la classification acoustique de ces clics sont très utiles pour détecter ces espèces de baleines à bec, même si leur portée est relativement réduite car les clics sont de haute fréquence (le maximum de leur énergie est au-dessus de 25 kHz) et très directifs [7-9]. Leur portée a été estimée à une distance de 4 kilomètres dans les meilleures conditions [11].

2.1 Mésoplodons de Blainville

Ils sont connus pour émettre des clics différents selon la phase d'écholocalisation : recherche ou capture de la proie [12]. Les clics correspondant à la phase de recherche sont appelés clics réguliers et ceux correspondant à la phase de capture sont appelés clics de "buzz".

Les clics réguliers ont un ICI compris entre 0,2 s et 0,4 s et sont connus pour avoir les caractéristiques suivantes [8-9, 12] :

- maximum d'énergie entre 25 et 50 kHz,
- modulation de fréquence ascendante,
- durée d'environ 270 μ s.

Ils ont un niveau sonore de l'ordre de 200-220 dB réf. 1 μ Pa à 1 m [8].

Les clics de "buzz" sont connus pour avoir les caractéristiques suivantes [12] :

- maximum d'énergie entre 25 et 80 kHz,
- durée d'environ 100 μ s.

Nous avons observé un ICI qui pouvait atteindre une valeur de 3 ms dans les enregistrements utilisés et décrits dans le paragraphe suivant.

Ces propriétés correspondent aux clics qui se trouvent sur l'axe d'émission. La figure 1 donne le spectrogramme, le spectre et la forme temporelle d'un clic régulier sur l'axe ou proche de celui-ci, provenant des enregistrements décrits dans le paragraphe suivant. Sur cette figure, les caractéristiques données ci-dessus sont bien vérifiées.

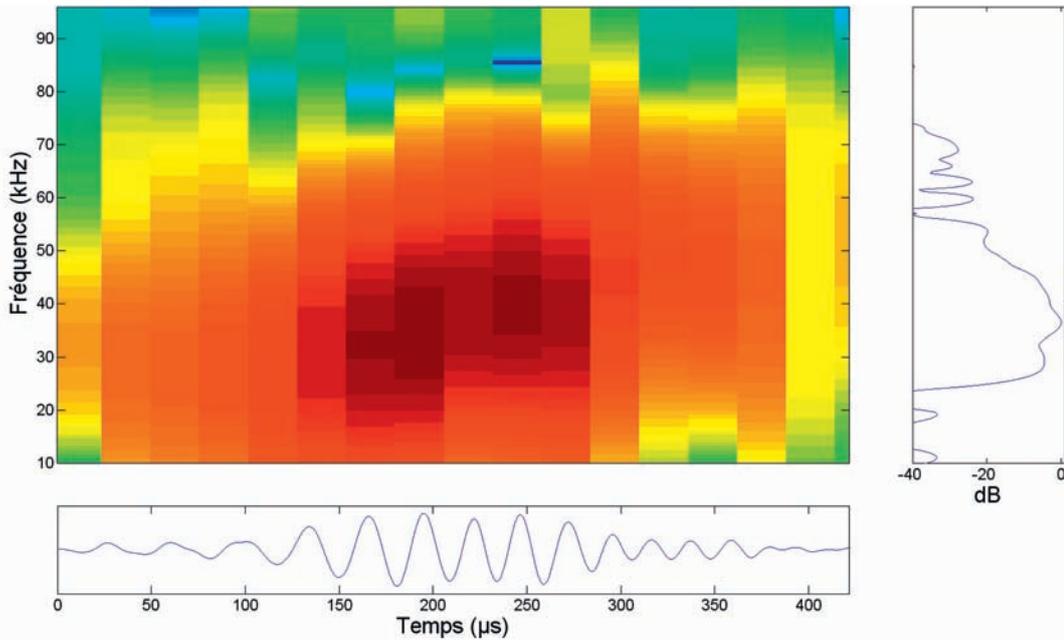


Figure 1 : Spectrogramme, spectre normalisé (sur la droite), et forme temporelle (en bas) d'un clic de mésoplodon de Blainville sur l'axe.

2.2 Baleines de Cuvier

Pour cette espèce, les clics sur l'axe ont une durée d'environ $200 \mu\text{s}$, ils sont modulés en fréquence (FM montante) avec une fréquence centrale aux alentours de 42 kHz, et une largeur de bande de 22 kHz à -10 dB. L'ICI typique est de 0,4 s [7]. Les clics sont très directionnels. Ils ont un indice de directivité estimé à 25 dB, le niveau sonore atteint 214 dB réf. $1 \mu\text{Pa}$ à 1 m [7]. Une estimation de la directivité peut être trouvée dans [7, 11]. La figure 2 donne le spectrogramme, le spectre et la forme temporelle d'un clic provenant des enregistrements décrits dans le paragraphe suivant.

3. ENREGISTREMENTS UTILISÉS

3.1 Mésoplodons de Blainville

Deux jeux de données ont été utilisés : l'un enregistré aux Bahamas, l'autre enregistré aux Canaries. Ces derniers se trouvent sur le site internet de Mobysound [13], maintenu par le CIMRS (Cooperative Institute for Marine Research Studies - Oregon State University, U.S.A).

Enregistrement des Bahamas

Le premier jeu de données a été enregistré à AUTECH (Atlantic Undersea Test and Evaluation Center) situé aux

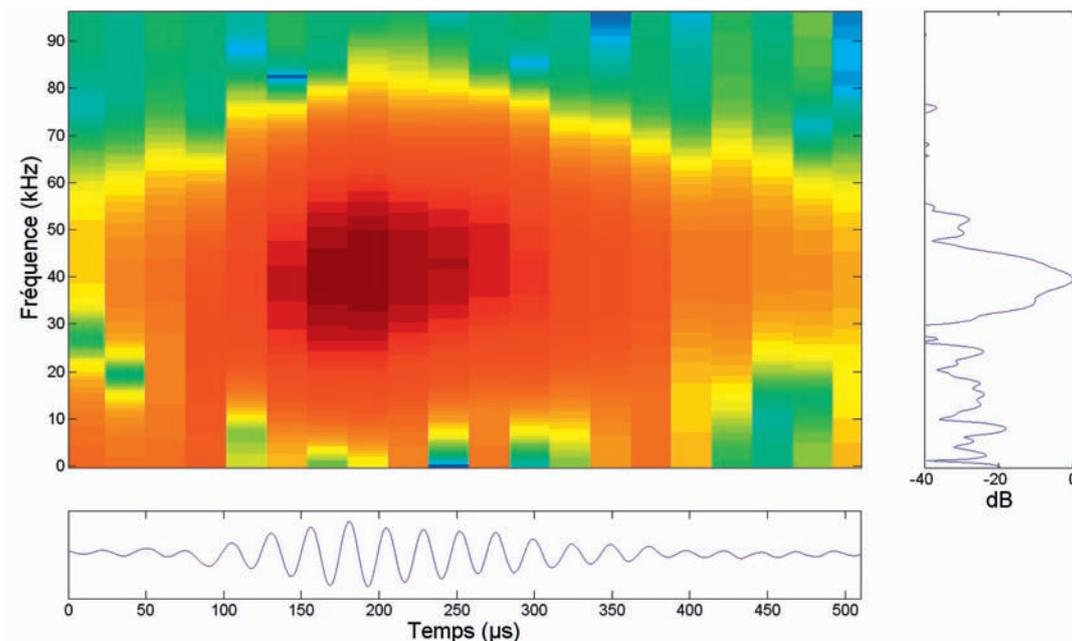


Figure 2 : Spectrogramme, spectre normalisé (sur la droite), et forme temporelle (en bas) d'un clic de baleine de Cuvier sur l'axe.

Bahamas, et a été mis à disposition par les organisateurs du *3rd International Workshop on the Detection and Classification of Marine Mammals using Passive Acoustics* (Boston, Juillet 2007) [14]. AUTEK possède un polygone de mesures où des hydrophones sont montés sur le fond. Ce polygone est localisé dans un canyon profond de l'île d'Andros aux Bahamas. La largeur de bande des hydrophones est de 50 Hz à 45 kHz ou de 8 à 50 kHz selon les hydrophones [14]. La fréquence d'échantillonnage est de 96 kHz. Un jeu de données d'entraînement et un jeu de données de test a été fourni. Le jeu de données d'entraînement contient seize échantillons d'enregistrement de mésoplodons de Blainville variant de 0,5 à 3 minutes, des enregistrements de dauphins de Risso (*Grampus griseus*) et de globicéphales tropicaux (*Globicephala macrorhynchus*). Le jeu de données de test comprend neuf enregistrements de 10 minutes. Dans trois de ces neuf fichiers, des clics de mésoplodons de Blainville sont présents et dans deux autres de ces fichiers une autre espèce est présente : globicéphale d'une part et cachalot (*Physeter macrocephalus*) d'autre part. Les autres fichiers tests comprennent en plus des espèces correspondant aux fichiers d'entraînement des clics de cachalots et des clics de dauphins tachetés du Pacifique (*Stenella attenuata (dubia)*).

Enregistrement des Canaries

Ce second jeu de données a été enregistré par un DTag (Digital Tag) [15] flottant entre deux eaux à l'île El Hierro, aux Canaries et a été mis à disposition par Mark Johnson. L'enregistrement dure 21 minutes, la fréquence d'échantillonnage est de 192 kHz. La qualité des données diminue en fonction du temps certainement dû au fait que la distance entre le DTag et les animaux augmente. Trois animaux étaient présents lors de cet enregistrement.

3.2 Baleines de Cuvier

Nous nous sommes aperçus après analyse que les signaux de baleines de Cuvier en notre possession ont été enregistrés par une antenne présentant une sensibilité accrue aux alentours de 40 kHz, ce qui a pour effet de modifier la forme spectrale et temporelle des signaux. L'étude sera donc à refaire avec des enregistrements de meilleure qualité. Toutefois, malgré la qualité des signaux, il nous a semblé intéressant de présenter brièvement certains résultats et d'exposer les difficultés rencontrées. La fréquence d'échantillonnage de ces signaux est de 192 kHz.

4. PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE

La méthode est basée sur celle décrite en [16]. Un détecteur de transitoires reposant sur le test de Page [17-19] est utilisé pour la détection des clics : l'instant d'arrivée, la durée, l'amplitude et la forme spectrale du clic sont stockés. Le clic est ensuite classifié comme pouvant appartenir ou non à une des deux espèces d'intérêt. Un MHT (Multi-Hypothesis Tracker) est utilisé pour associer les clics par animaux. L'association est basée sur l'hypothèse que l'amplitude et l'ICI entre les clics consécutifs varient peu. L'association par

animal permet en premier lieu de calculer l'ICI d'une séquence associée à un animal. En cas de présence de plusieurs animaux, il est difficile d'estimer l'ICI, or ce paramètre est caractéristique de ces espèces et il est un critère de classification essentiel. La classification est donc faite en deux étapes : la première basée sur une classification individuelle du clic, la deuxième basée sur une association de plusieurs clics provenant d'un même animal et ayant un ICI cohérent avec l'espèce classifiée. De plus l'association des clics par animal permet de donner une estimation du nombre d'animaux présents. Comme un animal peut s'arrêter de cliquer ou encore plus probablement l'enregistrement des clics est interrompu à cause de la directivité de ces derniers, pour un animal donné la piste n'est pas continue mais fragmentée, et comme pour l'instant nous ne connaissons pas de critères qui nous permettent d'attribuer les clics à un animal plutôt qu'à un autre, l'estimation du nombre d'animaux sera donnée par le plus grand nombre de pistes qui coexistent à un instant donné, ce qui correspond au nombre d'animaux émettant des clics et enregistrés en même temps.

4.1 Détecteur de transitoires

L'idéal pour le détecteur de transitoires est de pouvoir détecter les clics de différentes espèces, et donc d'un signal non connu.

Dans un premier temps le signal temporel est filtré passe-haut afin de s'affranchir de la plus grande partie du bruit (qui est généralement plus important en basse fréquence). La fréquence de coupure du filtre dépend de la qualité des signaux et des espèces sur lesquelles l'accent est mis. Le signal est ensuite élevé au carré et normalisé par moyennage exponentiel. Le test de Page est un détecteur séquentiel [20] qui permet de fournir de la robustesse pour des signaux dont la durée n'est pas connue car il permet de détecter le début et la fin d'un signal. Ce test séquentiel permet, à chaque étape, de choisir entre les trois possibilités suivantes :

- présence de signal ;
- absence de signal ;
- report de décision à l'étape suivante.

Le temps d'arrivée, la durée, l'amplitude et l'information spectrale du clic sont stockés pour les étapes successives.

La statistique du test de Page W est calculée pour chaque échantillon i de signal et est définie de la façon suivante :

$$W_{i+1} = W_i + Z_{i+1} - b \quad (1)$$

Dans l'équation (1), W_i est la statistique du test de Page pour l'échantillon i , Z_i est le signal filtré, élevé au carré et normalisé pour l'échantillon i , et b est le biais du test de Page pour l'initialisation ou l'arrêt d'une détection, avec $W_1 = 0$. Le choix de commencer, arrêter ou reporter la décision est fait en comparant la statistique du test de Page à un seuil.

L'estimation du bruit est mise à jour en dehors des détections. L'initialisation se fait par une moyenne de quelques secondes du signal filtré et élevé au carré.

L'algorithme est résumé figure 3.

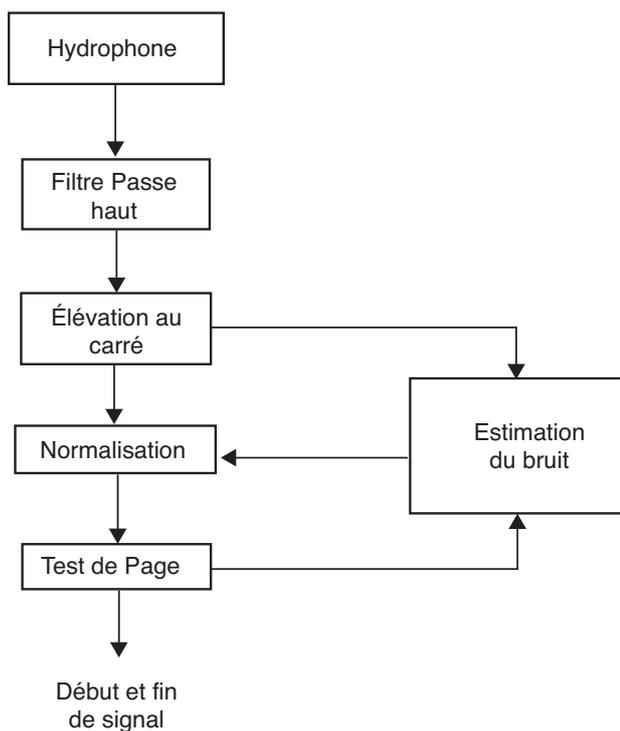


Figure 3 : Diagramme de l'algorithme de détection.

4.2 Classification

La classification est basée sur la forme spectrale. Les caractéristiques des clics décrits au paragraphe 2 correspondent aux clics émis dans l'axe. Toutefois, comme il a déjà été mentionné ci-dessus, pour les cétacés à dents, la forme spectrale et temporelle du même clic varient beaucoup en fonction de l'angle d'émission [6]. Cependant, pour les mésoplodons de Blainville, il semblerait que même pour les clics qui ne sont pas enregistrés sur l'axe, certaines caractéristiques spectrales restent vraies, à savoir :

- fréquence pic entre 25 kHz et 40 kHz,
- fréquence de coupure assez marquée du spectre entre 20 et 25 kHz.

Ces observations ont été faites essentiellement à partir de jeu de données d'entraînement fourni pour le workshop de Boston (enregistrement des Bahamas). Les critères de classification pour les mésoplodons de Blainville ont été élaborés à partir de ces caractéristiques. Il est intéressant de noter que certains clics ont de l'énergie à plus basse fréquence, en dessous de 20 kHz. Toutefois, même pour ces clics, le spectre a une fréquence de coupure entre 20 et 25 kHz.

Pour les baleines de Cuvier, nous préférons ne pas donner de critère étant donné les problèmes de qualité des enregistrements décrits au paragraphe précédent. Toutefois, ces derniers ont une fréquence de coupure moins marquée, et d'autres critères de classification seront certainement nécessaires.

4.3 Utilisation du "pisteur" pour associer les clics par animaux

L'entrée du pisteur (tracker) est une série temporelle de clics qui ont été classifiés comme appartenant à une des espèces recherchées. Cette série comprend des sous séquences qui proviennent d'un nombre inconnu d'animaux, ainsi que des fausses détections. Pour chaque sous séquence provenant du même animal, nous faisons les hypothèses suivantes : l'amplitude (dB) et l'ICI du clic varient lentement d'un clic au suivant. Le modèle dynamique pour chaque sous séquence est donc le suivant :

$$20 \log x_{k+1} = 20 \log x_k + w_k, \quad (2)$$

$$(t_{k+1} - t_k) = (t_k - t_{k-1}) + v_k. \quad (3)$$

x_k est l'amplitude du clic détecté au temps t_k ; w_k et v_k sont des termes de bruit de variance respectives $q_w (t_k - t_{k-1})$ et $q_v (t_k - t_{k-1})$.

A partir des équations (2 et 3), nous voyons que l'état de la sous-séquence au temps t_k est donné par $[x_k \ t_k \ t_{k-1}]$. En effectuant le changement de variables suivant $x_k = 20 \log x_k$, l'équation (2) devient :

$$X_{k+1} = X_k + w_k. \quad (4)$$

Ce modèle s'applique à l'amplitude du signal reçu, et néglige les pertes de transmission d'un clic au suivant.

L'identification des paramètres du modèle q_w et q_v devrait être établie à partir de quelques enregistrements de bonne qualité pour lesquels un seul animal est présent.

Notre travail sur le MHT s'est focalisé jusqu'à maintenant sur la surveillance en mer ou à terre ; plus de renseignements peuvent être trouvés dans [21-22]. Dans ce travail, nous utilisons la même méthodologie d'association et la même logique de gestion des pistes en effectuant les modifications appropriées. Les erreurs de mesure d'amplitude et de temps d'arrivée sont négligées.

Le MHT traite la série temporelle de clics de façon séquentielle. A chaque étape, toutes les hypothèses de pistes provisoires sont mises à jour pour chaque clic. Au bout d'une certaine valeur de latence, appelée "nscan", une seule hypothèse globale est retenue, et toutes les hypothèses de pistes qui ne sont pas en accord avec cette dernière sont supprimées. La sélection de l'hypothèse globale est basée sur la maximisation de la somme de tous les scores de chaque piste. Le score de chaque piste est le logarithme du rapport de vraisemblance qui inclut un terme de pénalité à l'initialisation d'une piste.

Les hypothèses sur chaque piste sont générées sur la base d'un critère de validation :

- chaque clic a toujours la possibilité d'initier une piste provisoire ;
- un clic sera associé à une piste existante si l'ICI correspondant est assez faible et si l'amplitude du clic est suffisamment proche du précédent ;
- l'hypothèse d'initier une nouvelle piste est toujours considérée.

Nous n'avons pas d'enregistrement de qualité suffisante nous permettant d'évaluer les paramètres du modèle q_w et q_v . Toutefois l'ICI des mésoplodons de Blainville est connu pour varier entre 0,2 et 0,4 s [8-9] et celui des baleines de Cuvier est aux alentours de 0,4 s [7]. En présence de plusieurs animaux, l'association devient possible en utilisant ces contraintes même si les paramètres du modèle ne sont pas connus de façon satisfaisante.

Pour les figures illustrant le MHT dans les paragraphes suivants, une nouvelle couleur est utilisée pour chaque piste. Cinq couleurs sont utilisées. Pour une piste donnée, la couleur est la même sur la figure de l'amplitude que sur celle d'ICI.

5. RÉSULTATS SUR LES MÉSOPLODONS DE BLAINVILLE

5.1 Résultats sur les enregistrements des Bahamas

Pour un des fichiers du jeu de données d'entraînement des enregistrements des Bahamas, les figures 4-5 illustrent la sortie du MHT pour un cas où peu d'animaux sont présents (un ou deux maximum). Elles donnent respectivement l'amplitude et l'ICI des pistes générées par le MHT. On peut voir que la majorité des clics sont associés.

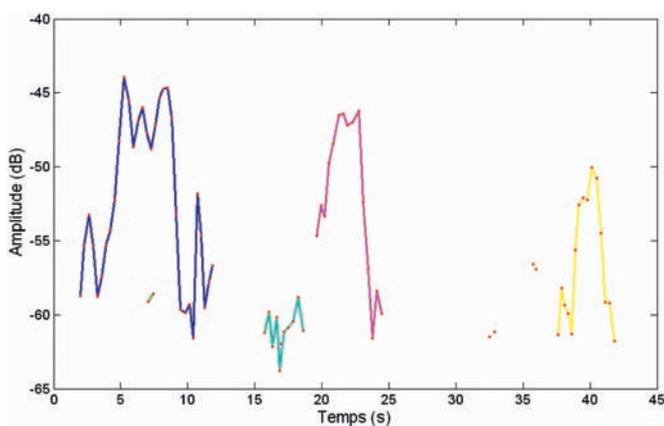


Figure 4 : Amplitude des clics détectés (rouge) et des pistes générées par le MHT (autres couleurs), pour un des fichiers du jeu de données d'entraînement enregistré aux Bahamas.

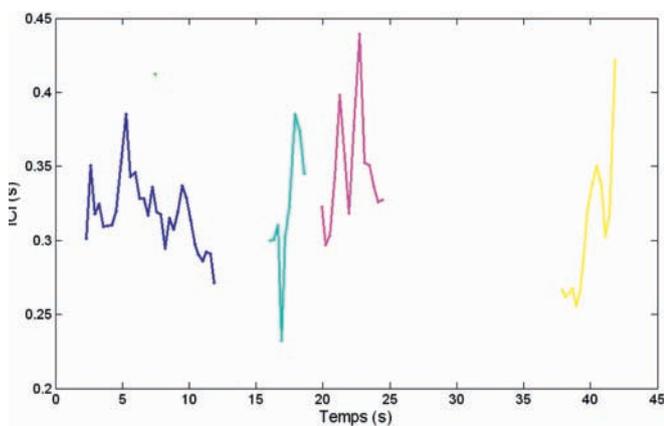


Figure 5 : Séquence d'ICI des pistes générées par le MHT pour les données correspondant à la Figure 4.

La figure 6 illustre la sortie du pisteur pour un deuxième fichier du jeu de données d'entraînement des enregistrements des Bahamas dans lequel plus d'animaux sont présents. Elle donne l'amplitude des pistes générées par le MHT. La figure 7 est un zoom de la figure précédente. Le nombre d'animaux estimé est donné par le nombre maximum de pistes qui coexistent en même temps. Il atteint la valeur de quatre pour ce fichier, mais il ne peut être comparé au nombre réel d'animaux qui n'est pas connu.

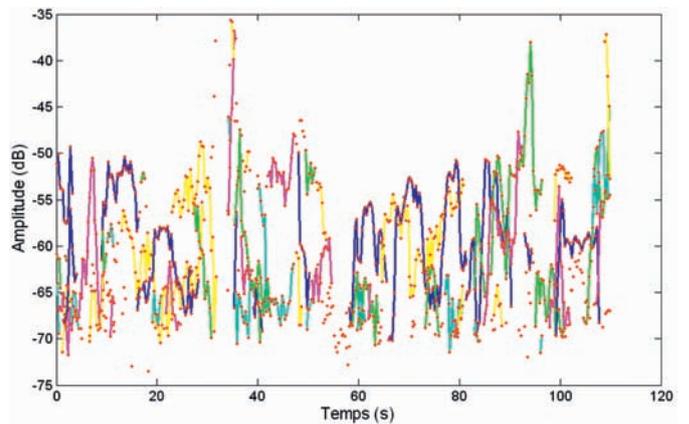


Figure 6 : Amplitude des clics détectés (rouge) et des pistes générées par le MHT (autres couleurs), pour un deuxième fichier du jeu de données d'entraînement enregistré aux Bahamas.

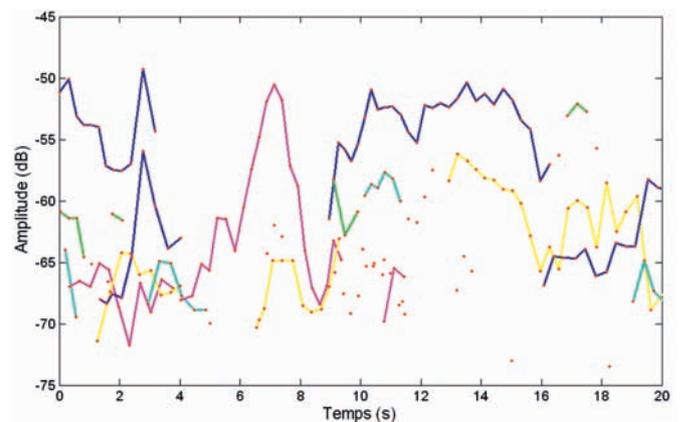


Figure 7 : Zoom de la Figure 6.

En utilisant cette méthode tous les fichiers test comprenant des clics de mésoplodons de Blainville ont été trouvés, que ce soit le fichier ou seul cette espèce était présente ou que ce soit les deux fichiers ou une autre espèce était présente.

5.2 Premiers résultats sur les enregistrements des Canaries

Nous avons utilisé ce fichier pour pouvoir tester nos critères de classification sur des enregistrements provenant d'un autre système et sur des animaux provenant d'un autre lieu géographique. De plus le nombre d'animaux est connu (trois). Nous pouvons donc comparer le nombre d'animaux estimés par notre méthode à la réalité. Nous avons constaté avec satisfaction que les clics étaient classifiés comme

appartenant à des mésoplodons de Blainville. Le nombre estimé d'animaux par notre méthode est présenté en figure 8. Nous pouvons noter que l'ordre de grandeur de l'estimation du nombre d'animaux présents est le bon durant la majorité du temps. Toutefois, on peut observer la présence de deux pics ponctuels avec un nombre pouvant dépasser trente. Ces pics ne sont pas réalistes, et ils ont lieu au moment où il y a présence d'un "buzz" (avec des valeurs atteignant un ICI inférieur à 5 ms). La limite basse imposée à l'ICI de 0,18 s pour palier à la méconnaissance des paramètres du modèle (cf. § 4.3), provoque ce phénomène : comme deux clics consécutifs ne peuvent pas être associés (ICI trop faible) un clic de "buzz" est associé à un autre clic de "buzz" qui est émis au moins 0,18 s plus tard. Cela fait un très grand nombre de pistes très courtes. Au lieu d'avoir une piste seule formée sur ces clics de "buzz", une multitude de pistes est formée sur ce "buzz". Ce phénomène s'est produit car les clics de "buzz" ont été classifiés comme étant des clics réguliers. Il pourrait y avoir plusieurs façons de résoudre ce problème. Les clics de "buzz" de mésoplodons de Blainville semblent pouvoir se distinguer des clics réguliers [12], nous avons pensé que c'était la méthode la plus propre et la plus élégante. D'après [12], les clics de "buzz" ont la particularité d'être plus courts (aux alentours de 100 μ s pour les clics sur l'axe) et de monter plus haut en fréquence (maximum d'énergie entre 25 et 80 kHz). En se basant sur ces propriétés, nous avons réussi, pour cet enregistrement, à établir des critères permettant de distinguer les clics de "buzz" des clics réguliers [23]. Toutefois, en revenant aux enregistrements des Bahamas, nous nous sommes aperçus que la majorité des clics de "buzz" ne satisfaisait aucunement les caractéristiques énoncées en [12]. Certains ont une durée supérieure à 800 μ s et un pic d'énergie inférieur à 20 kHz [23]. Nous avons cherché si nous pouvions trouver d'autres paramètres permettant de caractériser les clics de "buzz" des mésoplodons des Bahamas, mais nous nous sommes aperçus que ces clics pouvaient être très différents les uns des autres. Une analyse plus poussée nous a permis de mettre en évidence une propriété intéressante que nous exposons dans le paragraphe suivant.

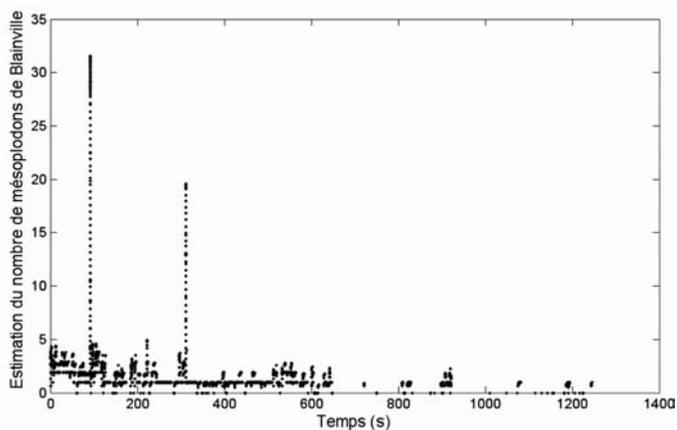


Figure 8 : Première estimation du nombre d'animaux présents pour l'enregistrement des Canaries.

5.3 Une propriété intéressante des clics de "buzz"

L'analyse précédente nous a permis de mettre en évidence que les clics de "buzz" ont un spectre qui varie peu d'un clic au suivant [23]. Cette propriété est vraie aussi bien pour les

"buzz" enregistrés aux Bahamas qu'aux Canaries. La figure 9 illustre cette propriété pour un "buzz" d'une durée de 5 secondes enregistré aux Bahamas ; elle donne le spectre de dix clics consécutifs produits au début du "buzz" et de dix clics consécutifs produits vers la fin de ce même "buzz". On peut noter, sur ce "buzz" qui est assez long, à quel point les spectres des clics du début sont proches entre eux, de même que ceux des clics de la fin. Par contre, la forme du spectre des clics du début est bien différente de la forme des clics de la fin. Le spectre des clics intermédiaires évolue progressivement de la forme du début à la forme de fin. Enfin, nous avons constaté que cette propriété de l'évolution lente du spectre des clics de "buzz" est vérifiée pour d'autres espèces [24].

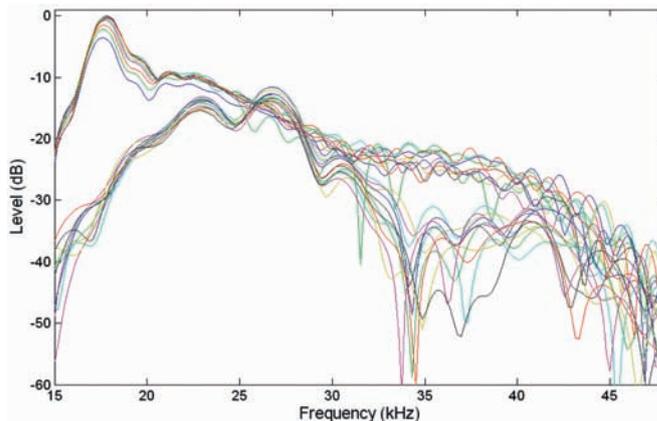


Figure 9 : Spectre de dix clics du début et dix clics de la fin d'un "buzz" des enregistrements des Bahamas.

Cette propriété nous a donné l'idée de modifier le pisteur afin de pouvoir l'utiliser pour associer et donc classer les clics de "buzz" (contrairement à notre idée de départ qui était de classer les clics avant l'entrée du pisteur).

5.4 Évolution de la méthode

La forme spectrale du clic est donc introduite comme paramètre supplémentaire pour le pisteur. De la même façon qu'auparavant, nous négligeons les erreurs de mesure. Nous avons introduit la similarité de spectre pour les clics réguliers, et nous espérons que ce paramètre améliorera leur association.

Le modèle dynamique pour chaque sous-séquence devient :

$$X_{k+1} = X_k + w_k, \quad (2)$$

$$(t_{k+1} - t_k) = (t_k - t_{k-1}) + v_k, \quad (3)$$

$$Sp_{k+1} = Sp_k + \xi_k. \quad (4)$$

avec $X_k = 20 \log x_k$, x_k étant l'amplitude du clic au temps t_k ; w_k et v_k sont des termes de bruit de variance $q_w(t_k - t_{k-1})$ et $q_v(t_k - t_{k-1})$, respectivement ; Sp_k est le spectre du clic au temps t_k , et ξ_k un terme de bruit.

Différentes combinaisons de paramètres ont été testées et nous n'avons pas trouvé de paramètres permettant l'association satisfaisante à la fois des clics de "buzz" et des clics réguliers. Les paramètres ont besoin d'être différents pour les deux types de clics car, pour les clics de "buzz" :

- la similarité du spectre d'un clic au suivant est plus importante ;

- une plus grande stabilité sur l'ICI est observée (même si les paramètres de bruit dépendent de l'ICI) ;
- une valeur plus élevée du paramètre de bruit q_w est nécessaire pour la variation d'amplitude.

Les valeurs de paramètres utilisés sont donc différentes pour les clics de "buzz" et les clics réguliers.

5.5 Nouveaux résultats sur les enregistrements des Canaries

La figure 10 présente le nombre d'animaux estimé après avoir introduit les modifications décrites ci-dessus. Sachant que trois animaux étaient présents [13], excepté deux courts instants où quatre animaux ont été détectés nous voyons que trois animaux sont estimés présents au début du fichier puis deux puis un. Ces résultats ne sont pas surprenants car il est bien précisé que la qualité des données diminue avec le temps [13], certainement par ce que les animaux s'éloignent du DTag au fur et à mesure du temps. Pour un des deux courts instants où quatre animaux ont été estimés, une observation plus minutieuse des pistes permet de constater que pendant un court instant, une piste a été formée sur des échos. Effectivement, quand deux pistes qui ont le même ICI coexistent, s'il n'y a pas d'erreur d'association, cela doit correspondre à la présence d'un écho. Pour le deuxième cas, il est probable qu'il y ait une erreur d'association à cet instant là.

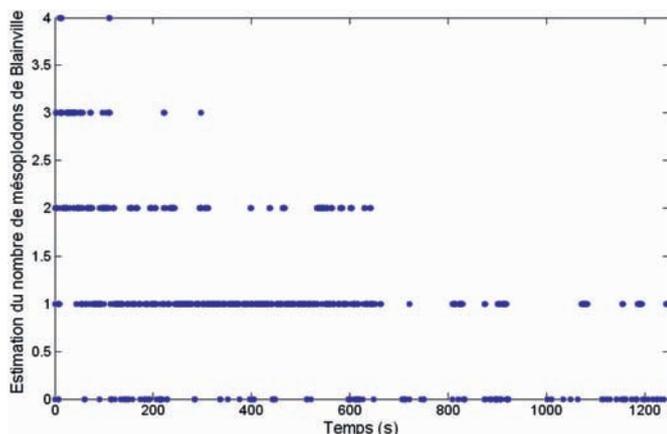


Figure 10 : Nouvelle estimation du nombre d'animaux présents pour l'enregistrement des Canaries.

La figure 11 présente l'ICI de toutes les pistes générées par la version modifiée du MHT pour cet enregistrement. Nous pouvons constater qu'en plus des pistes correspondant aux clics réguliers et dont l'ICI varie entre 0,2 s et 0,45 s, il y a de brèves pistes formées à trois moments distincts et dont l'ICI est très faible. Ces pistes correspondent à la présence de "buzz".

Les figures 12 a & b donnent un zoom respectivement de l'amplitude et de l'ICI de la piste générée par le MHT, correspondant au premier "buzz" de l'enregistrement des Canaries. On peut voir que les clics de "buzz" ont été associés de façon satisfaisante, et que les clics réguliers (piste bleu de la figure 12) n'ont pas été confondus avec les clics de "buzz" (piste magenta de la même figure) même s'ils ont une amplitude semblable. Une fois associée en séquence, en se basant sur la faible valeur de l'ICI la classification se fait de façon immédiate.

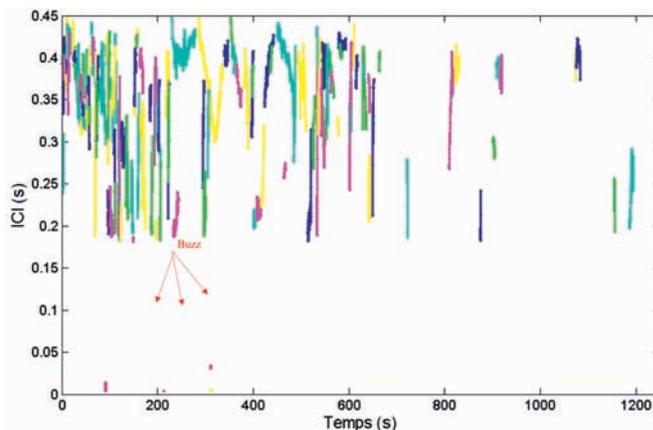


Figure 11 : ICI des pistes générées par le MHT modifié sur l'enregistrement des Canaries.

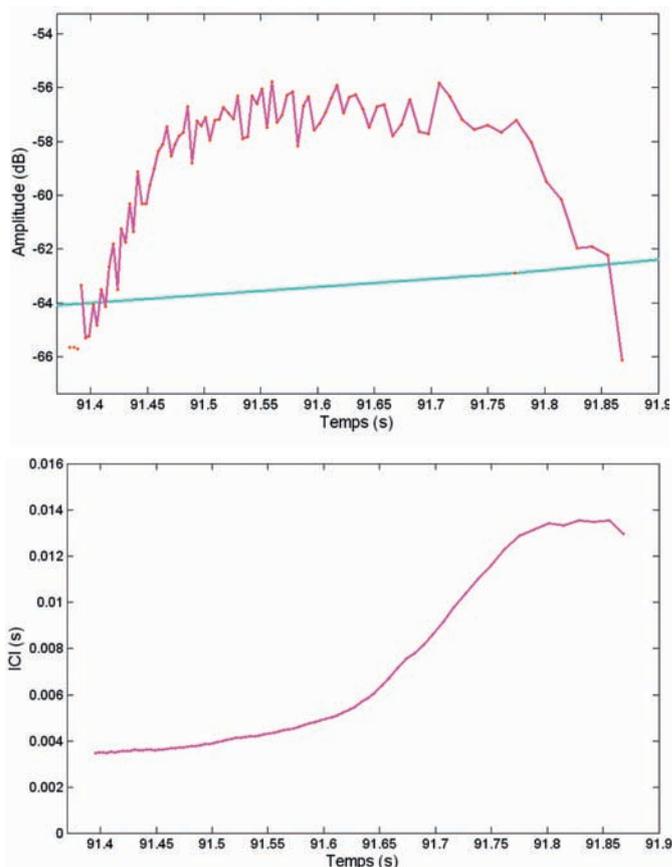


Figure 12 : Amplitude (a) et ICI (b) de la piste obtenue par le MHT modifié, sur le premier "buzz" de l'enregistrement des Canaries.

5.6 Conclusion

La méthode présentée au § 4 a permis de détecter la présence de mésoplodons de Blainville dans tous les fichiers test des enregistrements des Bahamas pour lesquels des mésoplodons de Blainville sont présents.

Nous avons aussi mis en évidence que les clics de "buzz" de mésoplodons de Blainville peuvent être très différents de

ceux décrits dans la littérature, et très différents les uns des autres, ce qui rend leur classification individuelle très difficile, voire infaisable. Toutefois, nous avons mis en évidence une propriété intéressante : les clics de "buzz" ont un spectre qui évolue lentement. Cette propriété nous a donné l'idée de faire évoluer le pisteur. Ces évolutions ont permis :

- l'amélioration de l'association des clics réguliers (observation des pistes obtenues pour divers fichiers du jeu de données (une étude plus poussée des résultats serait nécessaire) ;
- la classification des clics de "buzz", (comme séquence et non de façon individuelle).

L'ordre de grandeur du nombre estimé d'animaux pour le seul enregistrement dont le nombre d'animaux est connu est satisfaisant.

6. PREMIERS RÉSULTATS SUR LES BALEINES DE CUVIER

Comme mentionné dans le § 4, les critères de classification doivent être élaborés à partir d'enregistrements de meilleure qualité. Il semblerait pourtant que la classification de ces clics soit plus difficile car le spectre ne présente pas une montée aussi nette de l'énergie pour une fréquence située entre 20 et 25 kHz. Pour un fichier dans lequel seulement des baleines de Cuvier étaient présentes (pas de problème de classification des clics), nous avons voulu tester comment fonctionnait le pisteur en utilisant les mêmes paramètres que ceux des enregistrements de mésoplodons de Blainville. Dans ce fichier, des clics de baleines de Cuvier sont présents de façon régulière pendant plus de 20 min. Dans cet enregistrement, il y a un bruit aux alentours de 38 kHz, créé par le générateur utilisé lors de cette expérimentation. Ce bruit a généré la détection de nombreux transitoires que nous avons éliminés en nous basant sur le critère de spectre avec un pic très étroit aux alentours de 38 kHz. La figure 13 donne l'amplitude des pistes générées par le pisteur en utilisant les mêmes paramètres que ceux utilisés par les mésoplodons de Blainville. Sur cette figure, nous pouvons voir que la majorité des clics ne sont pas associés et que les pistes sont de courte durée. Il semblerait donc que l'association des clics de baleines de Cuvier requiert des paramètres plus lâches, ce qui rend l'association plus difficile quand plusieurs animaux sont présents. Cette phrase est au conditionnel, car le problème d'antenne mentionné au § 3 transforme le spectre des clics. Du coup, nous ne savons pas l'influence que cela a sur l'association. De plus, l'élimination des transitoires créés par le générateur a pu aussi éliminer des clics de baleines de Cuvier. En effet, il y a des détections pour lesquelles un clic de faible amplitude se superpose au bruit du générateur. Or cette méthode est basée sur la détection de clics consécutifs et ceci a aussi pu perturber l'association.

Cette méthode mérite donc d'être approfondie pour les clics de baleines de Cuvier avec des enregistrements de meilleure qualité.

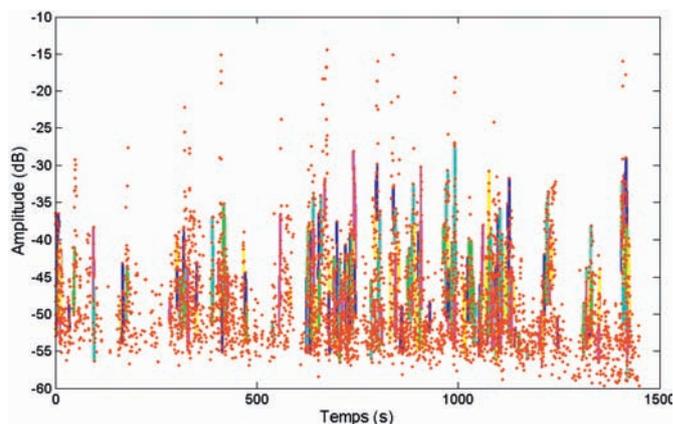


Figure 13 : Amplitude des clics détectés (rouge) et des pistes générées par le MHT (autres couleurs), pour un fichier d'enregistrement de baleines de Cuvier.

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons présenté les premiers résultats obtenus par notre méthode pour la détection et la classification de deux espèces de clics de baleines à bec. La détection des clics se fait par un détecteur de transitoires basé sur le test de Page. La classification se fait en deux étapes, en premier lieu une classification individuelle des clics est faite (elle est pour l'instant basée sur la forme spectrale du clic). Les clics sont ensuite associés par animaux à l'aide d'un algorithme de pistage (MHT tracker) basé sur les hypothèses que l'amplitude, l'ICI et le spectre varient peu d'un clic au suivant. L'association des clics permet de calculer l'ICI, ce qui est un autre critère de classification important pour les baleines à bec. Les résultats obtenus pour les mésoplodons de Blainville sont prometteurs. Il est difficile de conclure sur les baleines de Cuvier à cause des problèmes de qualité des enregistrements sur lesquels nous avons travaillé. Toutefois, la classification et l'association des clics de baleines de Cuvier semblent plus difficiles.

De nombreuses voies seraient à explorer pour améliorer toutes les étapes de cette méthode. Davantage de recherches concernant les clics de baleines à bec devraient permettre d'améliorer aussi bien la classification individuelle que l'association.

Il serait aussi intéressant d'avoir un simulateur de clics pour pouvoir tester la méthode en faisant varier les paramètres de façon contrôlée afin d'améliorer les diverses étapes de la méthode, et surtout de pouvoir quantifier la qualité des résultats.

Notons aussi que la qualité des enregistrements est très importante pour ce travail.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de cette étude. Nous remercions toutes les personnes impliquées dans la récolte, la préparation et la distribution des jeux de

données et tout particulièrement : Naval Undersea Warfare Center (NUWC), Division Newport ; Oregon University (à travers le site internet MobySound) ; Mark Johnson du Woods Hole Oceanographic Institution.

Ce travail a été principalement financé par le contrat n° 08 50 001 00 370 83 45 de la marine nationale. Un remerciement tout spécial à l'ICA Frédéric Rougé.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] FRANTZI A.: "Does Acoustic Testing Strand Whales?". *Nature* (vol. 392: 29, 1998).
- [2] BALCOMB K.C.I. and CLARIDGE D.E.: "A Mass Stranding of Cetaceans Caused by Naval Sonar in the Bahamas". *Bahamas Journal of science* (vol. 2: 2-12, 2001).
- [3] D'AMICO A., GISINER R.C., KETTEN D.R., HAMMOCK J.A., JOHNSON C., TYACK P.L. and MEAD J.: "Beaked Whale Strandings and Naval Exercises". *Aquatic Mammals* (vol. 35(4): 452-472, 2009).
- [4] TYACK P.L., JOHNSON M.P., AGUILAR DE SOTO N.A., STURLESE A., MADSEN P.T.: "Extreme Diving of Beaked Whales (*Mesoplodon densirostris*)". *Journal of Experimental Biology* (vol. 209: 4238-4253, 2006).
- [5] BAIRD R.W., WEBSTER D.L., Mc SWEENEY D.J., LIGON A.D., SCHORR G.S., BARLOW J.: "Diving Behavior of Cuvier's (*Ziphius cavirostris*) and Blainville's (*Mesoplodon densirostris*) Beaked Whales in Hawaii". *Canadian Journal of Zoology* (vol. 84: 1120-1128, 2006).
- [6] AU W. W. L.: "The Sonar of Dolphins". New York, NY: Springer, 1993.
- [7] ZIMMER W.M.X., JOHNSON M.P., MADSEN P.T., TYACK P.L.: "Echolocation Clicks of Free-Ranging Cuvier's Beaked Whales (*Ziphius cavirostris*)". *Journal of the Acoustical Society of America* (vol. 117(6): 3919-3927, 2005).
- [8] JOHNSON M.P., MADSEN P.T., ZIMME W.M.X., AGUILAR DE SOTO N.A., TYACK P.L.: "Beaked Whales Echolocate on Prey". *Proceedings of the Royal Society London, B* (sup) (vol. 271: S383-S386, 2004).
- [9] MADSEN P.T., JOHNSON M.P., AGUILAR DE SOTO N.A., ZIMMER W.M.X., TYACK P.L.: "Biosonar Performance of Foraging Beaked Whales (*Mesoplodon densirostris*)". *Journal of Experimental Biology* (vol. 208: 181-194, 2005).
- [10] RANKIN S., BARLOW J.: "Sounds Recorded in the Presence of Blainville's Beaked Whales, *Mesoplodon densirostris*, near Hawai'i (L)". *Journal of the Acoustical Society of America* (vol. 122(1): 42-45, 2007).
- [11] ZIMMER W.M.X., HARWOOD J., TYACK P.L., JOHNSON M.P., MADSEN P.T.: "Passive Acoustic Detection of Deep-Diving Beaked Whales". *Journal of the Acoustical Society of America* (vol. 124(5): 2823-2832, 2008).
- [12] JOHNSON M.P., MADSEN P.T., ZIMMER W.M.X., AGUILAR DE SOTO N.A., TYACK P.L.: "Foraging Blainville's Beaked Whales Produce Distinct Click Types Matched to Different Phases of Echolocation". *Journal of Experimental Biology* (vol. 209 (24): 5038-5050, 2006).
- [13] "<http://hmsc.oregonstate.edu/projects/MobySound/MsSoundSets.html>
- [14] MORETTI D., DI MARZIO N., MORISSEY R., MELLINGER D.K., HEIMLICH S., PETTIS H.: "Overview of the 3rd International Workshop on the Detection and Classification of Marine Mammals Using Passive Acoustics". *Canadian Acoustics* (vol. 36(1): 7-11, March 2008).
- [15] JOHNSON M.P., YACKT P.L.: "A Digital Acoustic Recording Tag for Measuring the Response of Wild Marine Mammals to Sound". *IEEE Journal of Oceanic Engineering* (vol. 28: 3-12, 2003).
- [16] GERARD O., CARTHEL C., CORALUPPI S., WILLETT P.: "Feature Aided Tracking for Marine Mammal Detection and Classification". *Canadian Acoustics* (vol. 36(1): 13-19, March 2008).
- [17] PAGE S.E.: "Continuous Inspection Schemes". *Biometrika* (vol. 41: 100-115, 1954).
- [18] ABRAHAM D.A., WILLETT P.: "Active Sonar detection in Shallow Water Using the Page Test". *IEEE Journal of Oceanic Eng.*(vol. 27 (1), January 2002).
- [19] ABRAHAM D.A.: "Passive Acoustic Detection of Marine Mammals". *SACLANTCEN SM 351*, NATO Undersea Research Centre, La Spezia, Italy, 2000.
- [20] WALD A.: "Sequential Analysis". Wiley, New York, 1947.
- [21] CORALUPPI S., CARTHEL C.: "Recursive Track Fusion for Multi-Sensor Surveillance". *Information Fusion* (vol. 5(1), March 2004).
- [22] CORALUPPI S., CARTHEL C.: "Distributed Tracking in Multistatic Sonar". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* (vol. 41(3), July 2005).
- [23] GERARD O., CORALUPPI S., CARTHEL C.: "Analysis and Classification of Beaked Whale Buzz Clicks". *Proceedings of Passive 08*, October 2008, Hyères, France.
- [24] GERARD O., CARTHEL C., CORALUPPI S.: "Classification of Odontocete Buzz Clicks Using a Multi-Hypothesis Tracker". *Proceedings of OCEANS 2009*, May 2009, Bremen, Germany.

"SONO-PROXY" : UN CAPTEUR NON INTRUSIF DU COMPORTEMENT DE LA COQUILLE SAINT-JACQUES

par B. Kinda*, C. Gervaise*, L. Chauvaud**, V. Jaud*, S. Busson*, T. Robson**

RÉSUMÉ

Dans cet article, nous prouvons la faisabilité d'un suivi comportemental des organismes benthiques *in situ* sans dérangement en écoutant uniquement les sons qu'ils produisent. Notre modèle d'étude est la coquille Saint-Jacques (*Penecten maximus*). Ces travaux sont menés d'une part pour identifier et caractériser les sources de bruit ambiant en milieu très côtier et d'autre part pour définir un outil de suivi du comportement des organismes vivants marins utilisés par la communauté comme archives biologiques. A partir de mesures en laboratoire et de terrain, nous démontrons que l'activité de respiration de la coquille Saint-Jacques est associée à une production sonore mesurable. Cette activité, traduite par une ouverture et une fermeture rapide de la coquille, crée un son transitoire large bande à partir de 10 kilohertz d'une durée de l'ordre d'une seconde. Le niveau spectral de cette production sonore excède le bruit ambiant en rade de Brest ou dans l'archipel de Molène de 8 dB. Grâce à cet excédent, la portée de détection de ces sons est comprise entre 80 centimètres et 120 centimètres.

ABSTRACT

*In this paper, we prove the feasibility of an undisturbing in situ behavioral monitoring of benthic organisms by only listening to the sounds they produce. Our study model is the scallop ("coquille Saint-Jacques", *Penecten maximus*). This work is carried out firstly to identify and characterize the sources of noise in very shallow waters and secondly to define a tool for monitoring the behavior of marine organisms used by the community as biological archives. From laboratory and in situ measurements, we demonstrate that the scallop breathing activity is associated with sound production which can be measured. This activity, resulting in a rapid opening and closing of the shell, produces a broadband transient sound starting at 10 kHz with duration of about one second. The spectral level of the sonic production exceeds the ambient noise in the bay of Brest or the Molène archipelago by 8 dB. With this signal excess, the detection range of these sounds is made possible between 80 centimeters and 120 centimeters.*

* EA3876 & DTN, ENSIETA, 2 rue François Verny, 29200 Brest, France.

** LEMAR - UMR 6539 - Institut Universitaire Européen de la Mer, place Nicolas Copernic, 29280 Plouzané, France.

1. INTRODUCTION

Le Prix Nobel 1995 de chimie Paul Crutzen, de l'Université de Mainz, a proposé il y a quelques années le néologisme "Anthropocène" pour décrire cette nouvelle ère de notre planète marquée par l'impact croissant de l'humanité sur la biosphère. Si l'impact anthropique sur le climat de la planète ne peut désormais plus être nié, son ampleur reste toutefois relativement difficile à évaluer. Plus précisément, il est difficile d'estimer les parts respectives des activités anthropiques et de la variabilité climatique naturelle sur les changements observés de nos jours au niveau de la structure et du fonctionnement des écosystèmes. Dans cette optique, mais également dans l'objectif de modéliser correctement l'évolution future de ces écosystèmes, il est crucial de disposer d'informations permettant de quantifier l'importance des variations climatiques et environnementales naturelles avant toute influence humaine majeure, *i.e.* avant le début de l'ère industrielle. Il est notamment capital d'appréhender la variabilité naturelle passée du système océanique (*e.g.* température, salinité, production primaire), l'océan mondial étant un acteur essentiel du système climatique (circulation thermohaline, pompe biologique de carbone, etc.). Pour ce faire, les scientifiques font souvent appel à des enregistrements instrumentés de divers paramètres environnementaux. Ces enregistrements sont toutefois assez rares et épars. De plus, la longueur de ces séries temporelles n'excède généralement pas deux siècles pour les plus longues. Au-delà, la communauté scientifique utilise des *proxies* au sein de différents types d'archives naturelles comme les sédiments ou les coraux. Un *proxy* est une variable, souvent géochimique (rapports d'isotopes stables, concentrations élémentaires), dont la valeur est une fonction d'un paramètre environnemental tel que la température, la concentration en nutriments, la productivité, etc. (Wefer *et al.*, 1999). C'est dans cette optique que des activités de recherche se sont essentiellement focalisées sur l'utilisation des coquilles de mollusques comme archives de la variabilité passée de l'environnement marin côtier. Ces archives présentent de nombreux avantages par rapport aux carottes de sédiments ou de coraux, le premier d'entre eux étant la présence de marques de croissance formées avec une fréquence très élevée (par exemple des marques journalières) dans la matrice coquillière, permettant ainsi de replacer les variations du *proxy* étudié sur une échelle calendaire. Cette caractéristique confère aux mollusques un potentiel considérable en terme de reconstruction haute résolution des variations infra saisonnières des conditions environnementales, alors que les coraux et les sédiments n'offrent le plus souvent qu'une résolution infra annuelle à décennale. D'autre part, les mollusques permettent une couverture géographique très large des enregistrements de type *proxies* (écosystèmes polaires, tempérés et tropicaux, estuaires, zones côtières, plateau continental, sources hydrothermales, etc.). De toutes les familles de mollusques ayant été étudiées dans un cadre paléocéanographique, celle des coquilles Saint-Jacques (*Bivalvia* ; *Pectinidae*) compte parmi les plus intéressantes. Les études menées ont notamment démontré que la coquille Saint-Jacques européenne, *Pecten maximus*, était un outil puissant pour décrire l'hydroclimat, puisque leurs coquilles enregistrent à très haute fréquence de nombreuses informations hydrobiologiques nécessaires à la compréhension du fonctionnement des écosystèmes côtiers

et de leur climat (présence de stries de croissance journalières chez *Pecten maximus*, Chauvaud *et al.*, 1998 ; Thébault *et al.*, 2006 ; Thébault *et al.*, 2007). En ce qui concerne *Pecten maximus*, il a déjà été démontré des covariations de floraisons phytoplanctoniques et de ralentissements de croissance (Chauvaud *et al.*, 1998 ; Lorrain *et al.*, 2000), des concentrations en vanadium et nickel au sein de la calcite des coquilles ayant vécu la catastrophe pétrolière de l'Erika (Chiffolleau *et al.*, 2004), de la respiration/calcification et du $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ et $\delta^{13}\text{C}_{\text{calcite}}$ (Lorrain *et al.*, 2004), de la température et du $\delta^{18}\text{O}_{\text{calcite}}$ des valves (Chauvaud *et al.*, 2005), du rapport $(\text{Sr}/\text{Ca})_{\text{calcite}}$ et de la croissance des valves (Lorrain *et al.*, 2005), et très récemment, des floraisons phytoplanctoniques et des concentrations coquillières en baryum et molybdène (Barats *et al.*, 2009 ; Thébault *et al.*, 2009). Reste aujourd'hui à comprendre ce qui est à l'origine des variations de la croissance de cet animal. Puisque les informations biogéochimiques qui sont enregistrées dans les valves de *Pecten maximus* dépendent de la taille des incréments journaliers alors il est aisé de percevoir l'intérêt que revêt une étude du comportement de ce bivalve pour comprendre la fonction de passage entre conditions environnementales et croissance de l'animal durant les périodes où l'animal présente des points d'inflexion dans cette dernière.

Pour *Pecten maximus*, un mouvement régulier et fréquent d'ouverture et de fermeture de ses deux valves permet de renouveler l'eau contenue dans la coquille et rend compte de l'activité ventilatoire de l'animal. Ce comportement régulier est parfois associé à des mouvements plus brusques et moins fréquents de fuites en présence de prédateurs. *Pecten maximus* est une espèce endogée et cherche à s'enfouir par des mouvements brusques en position verticale. Pour être satisfaisant, le suivi de ces différents comportements doit être réalisé sur le long terme, de façon la moins intrusive possible et ceci sur un nombre significatif d'individus. Pour cela, les moyens de suivi vidéo ont été testés et ont montré leurs limites pour le suivi sur de longues périodes puisqu'ils sont sensibles aux bio-salissures. L'une des pistes prometteuses envisagée est de développer des capteurs de mouvement miniatures autonomes collés sur les coquilles pour suivre au cours du temps leurs activités comme cela l'a été fait pour les moules, *Mytilus edulis* (Robson *et al.*, 2009) et les huîtres *Crassostrea virginica* (Frank *et al.*, 2007). La mise en œuvre de ces capteurs reste cependant difficile, coûteuse et la question de la perturbation du comportement des spécimens étudiés est ouverte en particulier lorsque l'on s'intéresse aux espèces subtidales vagiles.

A l'image de la production sonore des poissons (Loye & Proudfoot., 1946), des crustacés (Hazlett & Winn, 1962) ou des crevettes claqueuses (Everest *et al.*, 1948; Au & Banks, 1998; Ferguson & Cleary, 2001), nous soupçonnons que ces activités valvaires très transitoires chez *Pecten maximus* produisent des sons qui peuvent être mis à profit pour leur suivi comportemental. Nous présentons ici une étude de faisabilité du monitoring par acoustique passive (PAM¹) des mouvements valvaires chez *Pecten maximus*. Nos travaux préliminaires permettent entre autre de définir le concept novateur de sono-proxy et mettent en perspective l'acoustique passive comme un moyen non intrusif de monitoring du comportement des organismes vivants dans leur milieu naturel par la production sonore qu'ils génèrent. Le présent

¹ Passive Acoustic Monitoring

travail démontre que l'activité valvaire de *Pecten maximus* produit des sons dont nous mesurons le niveau. Ce niveau sonore est comparé aux niveaux de bruit ambiant que l'on peut trouver dans le milieu naturel de cet animal, la rade de Brest (milieu côtier très anthropisé) et le parc naturel marin de la mer d'Iroise (milieu côtier faiblement anthropisé). Notre capacité à détecter *in situ* la production sonore de *Pecten maximus* est démontrée.

Dans cet article, le paragraphe 2 présente les mesures et expériences disponibles pour l'étude ainsi que les méthodes utilisées. Le paragraphe 3 présente les résultats, qui sont analysés dans le paragraphe 4. Finalement, le paragraphe 5 tire les conclusions et présente les perspectives de cette étude préliminaire.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Matériel expérimental

Nos travaux exploitent les résultats de 5 jours d'expériences réalisées en 2009 et 2010 dont 3 en laboratoire et 2 en milieu naturel. Lors de ces expériences, deux chaînes de mesure des sons ont été utilisées. La première chaîne dite "B&K" est composée d'un hydrophone large bande 8106 Bruel et Kjaer de sensibilité hydrophonique égale à -171 dB réf ($1\mu\text{Pa/V}$), d'un conditionneur de signaux hydrophoniques Nexus Bruel et Kjaer et d'un enregistreur numérique de sons PMD 620 Marantz utilisé avec une fréquence d'échantillonnage égale à 98 kilohertz et une dynamique de quantification égale à 24 bits. Autonome mais de qualité métrologique sensiblement plus faible, la seconde chaîne de mesure dite "AURAL" est un enregistreur AURAL développé par la société Multi-Electronique (MTE©, <http://www.multi-electronique.com/>) constitué d'un hydrophone HTI large bande, d'une amplification de 22 dB et d'une conversion analogique numérique sur 16 bits à une fréquence d'échantillonnage égale à 32 kilohertz. Parallèlement aux mesures de sons, des capteurs de mouvement ont été utilisés. Collés sur les coquilles, ces accéléromètres miniaturisés fournissent un signal pré-amplifié et échantillonné à une fréquence égale à 12 hertz sur 16 bits de quantification.

Pour les expériences en laboratoire, des individus (5 au maximum) de *Pecten maximus* ont été déposées dans des aquariums (1 m x 1 m) d'un volume approximatif égal à 200 litres sur un fond sableux, la distance entre les coquilles et l'hydrophone de mesure est comprise entre 10 centimètres et 1 mètre. Ces aquariums et leurs coquilles ont été positionnés dans un local au calme, dans la pénombre et à température ambiante (entre 17 °C et 20 °C). Nous avons complété les expériences en laboratoire par deux expériences de terrain. La première a consisté à disposer sur une zone d'une centaine de mètres carrés en rade de Brest, plus de 100 coquilles Saint-Jacques préalablement draguées. La production sonore de ces coquilles a été enregistrée par une chaîne AURAL positionnée au centre de la zone pendant une journée. Ces mesures ont été effectuées dans le bruit ambiant de la rade de Brest, aire comportant de nombreuses activités anthropiques. Une seconde journée de mesure a été dédiée à la mesure du bruit ambiant dans une zone comportant moins d'activités anthropiques au sein du parc naturel marin de la mer d'Iroise (15 stations représentatives de la diversité des conditions dans l'archipel molénaï) afin de compléter notre connaissance sur le bruit ambiant de différentes zones d'études futures. Le tableau 1 résume les expériences réalisées.

2.2 Méthodes

2.2.1 Post-traitement des mesures hydrophoniques : reconstruction de la pression instantanée $p(t)$ en niveau absolu (μPa ou dB réf $1\mu\text{Pa}$)

Pour les deux chaînes de mesures des sons, les données sont enregistrées au format Wav, la dynamique de mesure, le gain d'amplification et la sensibilité de l'hydrophone sont annotés manuellement lors de l'expérience et liés aux fichiers Wav correspondants. Les fichiers Wav sont post-traités après les expériences grâce aux logiciels Adobe Audition® et MatLab®. La première phase commune à tous nos traitements est la reconstruction de la pression instantanée

Jour	Lieu	Capteurs	Objectifs
1	Laboratoire IUEM	Son : chaîne "B&K"	Connaissance et mesure de la production sonore de <i>Pecten maximus</i>
2	Laboratoire IUEM	Son : chaîne "B&K", chaîne "AURAL", capteur de mouvement	Connaissance et mesure de la production sonore de <i>Pecten maximus</i> , liens avec l'activité respiratoire
3	Laboratoire IUEM	Son : chaîne "B&K", chaîne "AURAL", capteur de mouvement	Connaissance et mesure de la production sonore de <i>Pecten maximus</i> , liens avec l'activité respiratoire
4	Rade de Brest	Son : chaîne "AURAL"	Connaissance du bruit ambiant en rade de Brest et étude de la détectabilité de la production sonore de <i>Pecten maximus</i> en milieu réel
5	Parc naturel marin de la mer d'Iroise	Son : chaîne "B&K"	Connaissance du bruit ambiant en rade de Brest et étude de la détectabilité de la production sonore de <i>Pecten maximus</i> en milieu réel

Tableau 1 : Synthèse des expériences exploitées dans le présent article.

née mesurée à l'hydrophone ($p(t)$) en niveau absolu exprimé en micro Pascal (μPa) ou en décibel référencé à un micro Pascal (dB réf $1\mu\text{Pa}$) en corrigeant les données numérisées au sein des fichiers Wav de la dynamique de mesure, du gain de traitement et de la sensibilité hydrophonique.

2.2.2 Connaissance et mesure de la production sonore de la coquille et du bruit ambiant

La mesure de la pression réalisée par l'hydrophone fournit une mesure temporelle globale incluant bruit ambiant et signal utile simultanément. Pour dissocier le bruit ambiant (qui peut être fort) de la production sonore de la coquille Saint-Jacques (qui peut être plus faible), nous utilisons le fait que le bruit ambiant et la production sonore de la coquille Saint-Jacques sont des vibrations acoustiques de fréquences différentes. Aussi à partir des mesures temporelles, pour connaître et identifier la production sonore de la coquille Saint-Jacques, nous construisons le spectrogramme (Hlawatsch & Boudreaux-Bartels, 1992) des mesures qui fournit une cartographie du niveau acoustique reçu (dB réf $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) dans l'espace temps/fréquence. Cette cartographie peut mettre en avant clairement les sons produits par la coquille Saint-Jacques et les zones de "silence" constituées de bruit ambiant uniquement.

En parcourant l'intégralité des mesures et en analysant le spectrogramme, nous pouvons d'une part extraire et isoler N_c segments utiles ($c_i(t)$, $i \in [1, N_c]$) de sons produits par la coquille Saint-Jacques et d'autre part extraire et isoler N_b segments de bruit ambiant ($b_j(t)$, $j \in [1, N_b]$). Nous construisons alors le niveau spectral sonore de ces deux contributions ($\gamma_c(f)$ et $\gamma_b(f)$) exprimés en $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ en moyennant le périodogramme (Stoica et Moses, 1997) de chaque segment.

2.2.3 Détectabilité et portée de la production sonore de *Pecten maximus in situ*

Les sons produits par la coquille Saint-Jacques autour de la fréquence f_0 sont détectables si le niveau spectral $\gamma_c(f_0)$ est supérieur à $\gamma_b(f_0)$. Dans ce cas, si R_0 (mètre) est la distance entre la coquille Saint-Jacques émettant les sons lors de nos expériences et l'hydrophone de mesure, alors la portée maximale de détection (R en mètre) de la coquille *in situ* en présence d'un bruit ambiant de niveau $\gamma_b(f_0)$ est donnée, sous l'hypothèse d'un modèle de propagation par perte sphérique (Lurton, 2002), par :

$$R = R_0 10^{\frac{\gamma_c(f) - \gamma_b(f)}{20}}$$

2.2.4 Comparaison mesures de mouvement et mesures des sons

Le mouvement des coquilles Saint-Jacques est enregistré par les capteurs de mouvement à une fréquence d'échantillonnage de 12 hertz (Robson *et al.*, 2009), les sons produits par ces mouvements sont audibles à des fréquences plus importantes et donc échantillonnés à une plus haute cadence. Aux faibles fréquences, le bruit ambiant est très élevé dans les mesures (Wenz, 1962). Aussi afin d'effectuer une comparaison entre mesures de mouvement et mesures de sons, nous avons prétraité les mesures de la façon suivante :

- mesure de mouvement $m(t)$: élévation au carré puis lissage par un filtre passe-bas RII d'ordre 1 avec un temps d'intégration égal à 0,5 seconde, le signal construit est l'enveloppe énergétique du mouvement que nous nommons $E_m(t)$,
- mesure de son $c(t)$: filtrage passe haut à partir de 2 500 hertz pour éliminer le bruit ambiant puis élévation au carré puis lissage par un filtre passe-bas RII d'ordre 1 avec un temps d'intégration égal à 0,5 seconde, le signal construit est l'enveloppe énergétique du mouvement que nous nommons $E_c(t)$.

3. RÉSULTATS

3.1 Exploration qualitative de la production sonore de la coquille Saint-Jacques

Lors de nos expérimentations en laboratoire, nous avons enregistré en continu les sons produits par les coquilles Saint-Jacques avec la chaîne de mesure "B&K", simultanément nous avons enregistré les mouvements des coquilles par simple observation visuelle ou grâce aux capteurs de mouvement, la date de chaque mouvement a été annotée. Grâce à ces dates, nous avons sélectionné les sons correspondant aux phases de mouvement pour calculer leurs spectrogrammes et découvrir les caractéristiques de ces sons. Dans la figure 1, nous présentons les caractéristiques des sons émis lors d'un mouvement typique d'ouverture et fermeture de la coquille lors de sa respiration.

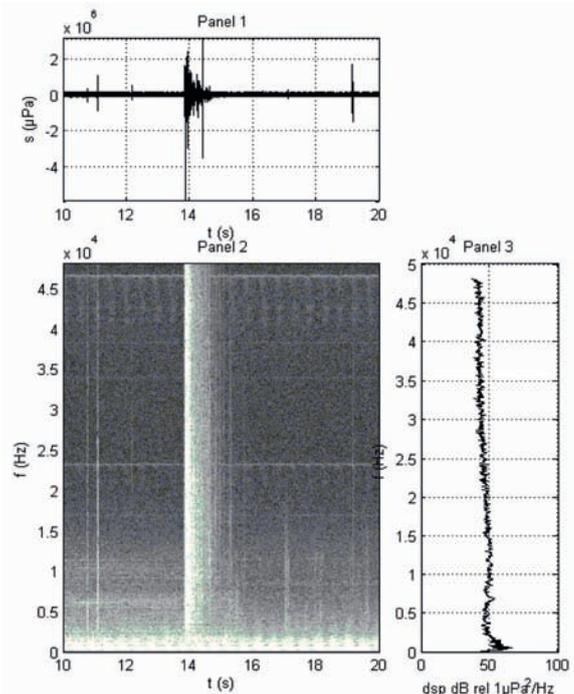


Figure 1 : étude du son produit lors d'un mouvement respiratoire typique, Panel 1 : évolution temporelle du niveau sonore, Panel 2 : carte temps/fréquence du niveau sonore (spectrogramme, taux de recouvrement = 50 %, $f_e = 96$ kHz, $L = 2048$; fenêtre = rectangle, la carte de niveau sonore exprimé en dB est représentée sur une échelle de gris avec une dynamique de 70 dB, le noir correspondant aux valeurs faibles et le blanc aux valeurs fortes), Panel 3 : évolution fréquentielle du niveau sonore.

Le spectrogramme des mesures montre deux composantes de fort niveau (zones blanches) bien séparables :

- un pavé temps/fréquence horizontal de 10 s à 20 s et de 0 Hz à 2 000 Hz : le bruit ambiant concentré principalement aux basses fréquences (entre 0 Hz jusqu'à 5 kHz) aux propriétés stationnaires dans le temps,
- un pavé temps/fréquence vertical de 14 s à 15 s et de 3 000 Hz à 45 kHz : la production sonore due à l'ouverture et la fermeture de la coquille Saint-Jacques, celle-ci est concentrée sur des lignes verticales dans le spectrogramme traduisant des sons courts, soudains, impulsionnels d'une durée de l'ordre de 1 seconde approximativement et contenu sur les moyennes et les hautes fréquences.

3.2 Comparaison entre les mesures de sons et les mesures de mouvement

Lors des nos expériences en laboratoire pour lesquelles nous avons eu simultanément en opération la mesure des sons et la mesure de mouvement, nous avons sélectionné 2 heures de mesure contenant une vingtaine de mouvements d'ouverture et fermeture et nous avons calculé les enveloppes énergétiques du mouvement et de son $E_m(t)$ et $E_c(t)$. La figure 2 présente le tracé superposé de ces deux quantités.

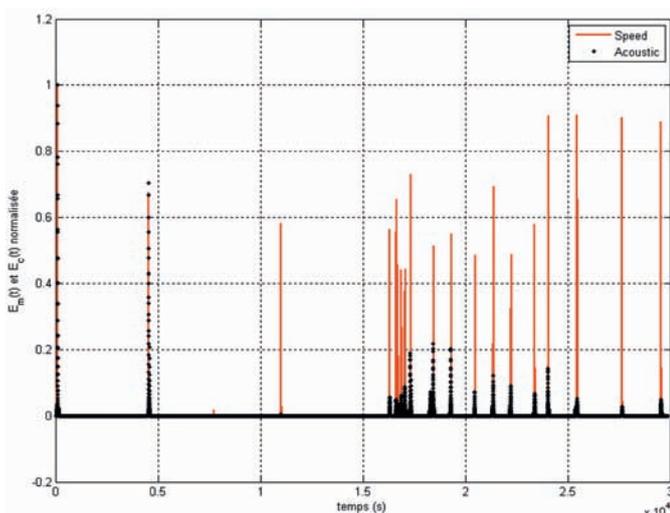


Figure 2 : comparaison des mesures de sons et de mouvement, en rouge $E_m(t)$, en noir $E_c(t)$.

La comparaison démontre une corrélation nette entre la puissance sonore reçue et le mouvement valvaire. Chaque mouvement ample est associé à un pic de son (le troisième pic vers $0,8 \times 10^4$ s est d'une amplitude trop faible pour être visible mais existe bien). On remarque toutefois que l'amplitude sonore ne suit pas forcément l'amplitude du mouvement. Les raisons probables sont l'évolution de la distance entre la coquille et l'hydrophone au cours du temps et une possible directivité de l'émission sonore.

3.3 Comparaison entre le niveau de la production sonore de la coquille Saint-Jacques et les niveaux de bruit ambiant naturels

A partir de nos différentes expériences, nous avons calculé le niveau spectral $\gamma_c(f)$ des sons émis par les coquilles Saint-

Jacques en rade de Brest mesuré avec la chaîne "AURAL" lors de leurs respirations et 2 niveaux de bruit ambiant :

- $\gamma_r(f)$ mesuré en rade de Brest avec la chaîne "AURAL",
- $\gamma_m(f)$ mesuré dans l'archipel de Molène avec la chaîne "B&K".

Nous présentons dans la figure 3 ces trois spectres.

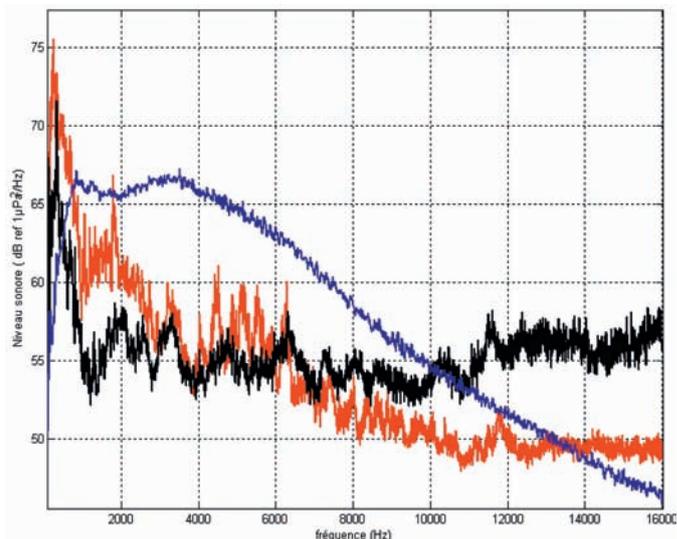


Figure 3 : Niveaux spectraux mesurés, en noir : $\gamma_c(f)$, en rouge : $\gamma_r(f)$ et en bleu : $\gamma_m(f)$

Le niveau de bruit ambiant dans la rade de Brest est supérieur à celui de l'archipel de Molène aux fréquences inférieures à 500 hertz, le trafic maritime soutenu en rade de Brest et quasi inexistant dans l'archipel de Molène pouvant expliquer cette différence. Aux fréquences intermédiaires comprises entre 500 hertz et 14 kilohertz le bruit ambiant de Molène dépasse celui de la rade de Brest, la différence de l'état de la mer entre un milieu ouvert comme la mer d'Iroise et un milieu plus fermé comme la rade de Brest pouvant expliquer cette tendance.

Aux fréquences inférieures à 4 kHz, le niveau spectral du bruit ambiant est supérieur au niveau spectral des sons produits par les coquilles Saint-Jacques alors qu'aux fréquences supérieures à 10 kHz la différence s'inverse et le niveau sonore produit par les coquilles est supérieur au niveau de bruit ambiant d'approximativement 6 dB pour la rade de Brest et 8 dB pour l'archipel de Molène.

La gamme de fréquence étudiée est limitée à 16 kilohertz par la chaîne d'acquisition "AURAL", cependant les évolutions des niveaux vers les hautes fréquences laissent penser qu'aux fréquences supérieures à 20 kilohertz la différence entre le niveau de coquille et celui du bruit de l'archipel de Molène pourrait augmenter de façon significative.

4. DISCUSSION

4.1 La production sonore des coquilles Saint-Jacques permet d'observer l'activité respiratoire

Lors de nos expériences, nous avons identifié trois comportements typiques : des mouvements de ventilation fréquents

et plus rarement des mouvements permettant la fuite (nage) et l'enfouissement. Nous avons constaté et démontré que ces trois comportements typiques étaient associés à une production sonore due soit aux mouvements des valves l'une sur l'autre lors de l'ouverture de la coquille soit au flux d'eau expulsé lors de la fermeture des coquilles. Logiquement puisque les trois types de comportement sont associés à des mouvements brusques, les sons induits sont transitoires de type impulsionnel.

4.2 La production sonore de la coquille est détectable en milieu naturel

Le niveau de la production sonore des coquilles Saint-Jacques devient supérieur à celui du bruit ambiant à partir de 10 kHz, nous avons mesuré que celui-ci est supérieur de 6 dB à celui de bruit ambiant en rade de Brest et de 8 dB à celui de l'archipel de Molène. Lors des expériences qui ont permis de mesurer le niveau sonore des coquilles, la distance entre les coquilles et l'hydrophone de mesure était comprise entre 10 centimètres et 40 centimètres. Aussi sous l'hypothèse de pertes sphériques, la portée de détection des coquilles en milieu naturel pour la rade de Brest est comprise entre 20 centimètres et 80 centimètres alors qu'elle est comprise entre 30 centimètres et 120 centimètres dans l'archipel de Molène.

Cette étude des niveaux sonores doit être complétée par la définition d'outils de détection automatique pour envisager une application opérationnelle du monitoring par acoustique passive. Le niveau sonore produit par la coquille prend la forme de courtes impulsions d'une durée de l'ordre d'une seconde balayant toutes les fréquences contenues entre 10 kilohertz et 50 kilohertz. Le signal émis par la coquille est donc de nature transitoire et impulsionnelle. Alors que la différence de niveau entre le niveau de la coquille Saint-Jacques et le bruit ambiant est limitée, cette nature impulsionnelle peut être mise à profit pour développer des détecteurs spécifiques aux signaux transitoires qui peuvent surpasser les détecteurs basés sur l'énergie notamment aux faibles rapports signal à bruit. La piste que nous envisageons est l'utilisation des moments d'ordre supérieur à partir d'outils qui ont démontré leur pertinence pour la détection des clics de mammifères marins (Gervaise *et al.*, 2010) et que nous avons d'ores et déjà testé dans une étude préliminaire sur les sons des coquilles Saint-Jacques (Busson *et al.*, 2010).

Lors de nos expériences sur le terrain, nous avons constaté que le bruit ambiant contenait de nombreux signaux transitoires de type impulsionnel que nous avons attribué à d'autres organismes benthiques. Ces signaux possèdent approximativement le même niveau que ceux de la coquille mais ont une durée beaucoup plus courte. Il sera donc nécessaire de compléter notre détecteur par un classificateur de transitoires pour réellement automatiser la fonction de monitoring de la coquille par acoustique.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons démontré que les mouvements valvaires associés permettant la fuite, l'enfouissement et la ventilation de la coquille Saint-Jacques produisaient des sons. Nous avons

mesurés les caractéristiques de ces sons comme leur niveau spectral et leur durée. Nous avons mesuré que le niveau spectral de la production sonore de la coquille dépassait celui du bruit de 6 à 8 dB en fonction des conditions et que cette différence procurait une portée de détection de l'ordre du mètre. La nature transitoire des sons produits indique qu'une automatisation de la détection pourra se faire à partir de détecteur de signaux transitoires notamment basés sur les moments d'ordre supérieur. Nos premiers résultats montrent donc un potentiel prometteur pour observer le comportement des coquilles Saint-Jacques *in situ*, sans contact et sans dérangement, en écoutant uniquement les sons qu'elles produisent.

A court terme, les perspectives à nos travaux se déclinent suivant un volet technique de l'acoustique et suivant un volet écologique en milieu marin. Pour le premier volet, il s'agira de développer les méthodes de traitement du signal pour traiter les sons mesurés automatiquement et pour détecter et suivre en fonction du temps le rythme des ouvertures et fermetures liés à la ventilation/respiration. Ces outils devront être capables de s'adapter aux faibles rapports signal à bruit et de pouvoir classifier les signaux transitoires. Pour le second volet, il s'agira de démontrer que la mesure de la production sonore de la coquille Saint-Jacques permet de suivre son comportement en fonction des conditions environnementales comme le cycle jour/nuit, une anoxie du milieu ou la présence d'un bloom d'algues toxiques, et possiblement d'identifier des réactions comportementales à ces changements. Nous débuterons par un travail en bassins dont on maîtrise les conditions environnementales et dans lesquels le bruit ambiant est faible puis dans un second temps nous irons dans un milieu naturel comme la rade de Brest.

A moyen terme, nous envisageons d'adapter cette méthode de monitoring par acoustique passif à d'autres espèces benthiques comme les moules ou encore les huîtres.

Il faut noter que ces travaux orientés vers l'écologie marine ont aussi leur apport en acoustique puisqu'ils nous permettent de comprendre finement les causes du bruit ambiant en milieu côtier tempéré à l'image des travaux qui ont été effectués sur le bruit des crevettes "claqueuses" dans des eaux plus chaudes.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier J. Meunier, l'équipe de plongeurs scientifiques de l'IUEM², le personnel du *Côte d'Aquitaine* pour leur assistance lors de la journée d'expérimentation en rade de Brest et L. Di Iorio, C. Ducatel, le personnel du parc naturel marin d'Iroise pour leur assistance lors de la journée d'expérimentation dans l'archipel de Molène. Ce travail a été partiellement financé par le projet ANR Blanc CHIVAS et le projet MER CALME du GIS³ Europôle Mer.

BIBLIOGRAPHIE

AU W & BANKS K (1998): "The acoustics of the snapping shrimp *Synalpheus parneomeris* in Kaneohe Bay". *J. Acous. Soc. Am.* 103 (1)

² Institut Universitaire Européen de la Mer ³ Groupement d'Intérêt Scientifique

- BARATS A., AMOUROUX D., CHAUVAUD L., PECHEYRAN C., LORRAIN A., THÉBAULT J., CHURCH T. M. and DONARD O. (2009): "High frequency Barium profiles in shells of the Great Scallop *Pecten maximus*: a methodical long-term and multi-site survey in Western Europe". *Biogeoscience* (6, 1-14).
- BUSSON S., GERVAISE C., BARAZZUTTI A., KINDA B., JAUD V., CHAUVAUD L., ROBSON A. (2010): "Higher-order statistics for bioacoustic click detection". 10^e Congrès Français d'Acoustique, 12-16 April 2010, Lyon.
- CHAUVAUD L., DUNBAR R., LORRAIN A., PAULET Y-M., THOUZEAU G., JEAN F., GUARINI J-M., MUCCIARONE D. (2005): "The shell of the Great Scallop *Pecten maximus* as a high frequency archive of paleoenvironmental change". *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 6 (DOI: 10.1029/2004GC000890).
- CHAUVAUD L., THOUZEAU G. & Y-M. PAULET (1998): "Effects of environmental factors on the daily growth rate of *Pecten maximus* juveniles in the Bay of Brest (France)". *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 227: 83-111).
- CHIFFOLEAU J-F., CHAUVAUD L., AMOUROUX D., BARATS A., DUFOUR A., PECHERAN C. and ROUX N. (2004): "Nickel and Vanadium contamination of benthic invertebrates following the "Erika" wreck". *Aquat. Living Resour.* (17: 273-280).
- EVEREST F., YOUNG W. & JOHNSON M. (1948): "Acoustical characteristics of noise produced by snapping shrimp". *J. Acous. Soc. Am.* 20 (2).
- FERGUSON B. & CLEARY J. (2001): "In situ source level and source position estimates of biological transient signals produced by snapping shrimp in an underwater environment". *J. Acous. Soc. Am.* 109 (6).
- FRANK D. M., HAMILTON J. H., WARD J.E & SHUMWAY S. E. (2007): "A fiber optic sensor for high resolution measurement and continuous monitoring of valve gape in bivalve molluscs". *Journal of Shellfish Research* (26(2):575-580).
- GERVAISE C., BARAZZUTTI A., BUSSON S., SIMARD Y. & ROY N. (2010): "Automatic detection of bioacoustics impulses based on kurtosis under weak signal to noise ratio". *Applied Acoust.* DOI: 10.1016/j.apacoust.2010.05.009).
- HAZLETT B. & WINN H. (1962): "Sound production and associated behavior of bermunda crustaceans (*Panulirus, gindactylus, Alpheus* and *Synalpheus*)". *Crustaceana* (4 (1): 25-38).
- HLAWATSCH F. and BOUDREAUX-BARTELS G. F. (1992): "Linear and quadratic time-frequency signal representations". *IEEE Signal Processing Magazine* (vol. 9, no. 2, pp. 21-67).
- LORRAIN A., PAULET Y-M., CHAUVAUD L., DUNBAR R., MUCCIARONE D., FONTUGNE M. (2004): " $\delta^{13}\text{C}$ variations in scallop shells: Increasing metabolic carbon contribution with body size?". *Geochimica and Cosmochimica Acta* (17: 3509-3519).
- LORRAIN A., GILLIKIN D., PAULET Y-M., CHAUVAUD L., NAVEZ J., LE MERCIER A., ANDRÉ L (2005): "Strong kinetic effects on Sr/Ca ratios in the calcitic bivalve *Pecten maximus*". *Geology* (12: 965-968).
- LORRAIN A., PAULET Y-M., CHAUVAUD L., SAVOYE N., NÉZAN E. & GUÉRIN L. (2000): "Growth anomalies in *Pecten maximus* from coastal waters (Bay of Brest, France): relationship with diatom blooms". *J. Marine Biological Association of the United Kingdom* (80: 667-673).
- LORRAIN A., PAULET Y-M., CHAUVAUD L., SAVOYE N., DONVAL A., SAOUT C. (2002): "Differential $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ signatures among scallop tissues: implications in ecology and physiology". *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* (275: 47-61).
- LOYE D. & PROUDFOOT D. (1946): "Underwater noise due to marine life". *J. Acoust. Soc. Am.* 18 (2).
- LURTON X. (2002): "An introduction to underwater acoustics: principles and applications". Springer-Verlag (ISBN 3-540-42967-0).
- ROBSON A. A., THOMAS G. R., DE LEANIZ C. G. (2009): "Valve gape and exhalant pumping in bivalves: optimization of measurement". *Aquatic Biology* (6: 191-200).
- STOICA P., MOSES R.: "Introduction to Spectral analysis (1997)". Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458.
- THEBAULT J., CHAUVAUD L., CLAVIER J., FICHEZ R., MORIZE E. (2006): "Evidence of bi-daily striae in the tropical scallop *Comptopallium radula* using calcein marking". *Marine Biology* (149: 257-267).
- THEBAULT J., CHAUVAUD L., CLAVIER J., GUARINI J., DUNBAR R. B., FICHEZ R., MUCCIARONE D. A. and MORIZE E. (2007): "Reconstruction of seasonal temperature variability in the tropical Pacific Ocean from the shell of the scallop, *Comptopallium radula*". *Geochimica & Cosmochimica Acta* (71(4), 918-928).
- THEBAULT J., CHAUVAUD L., CLAVIER J., JACQUET S., BARATS A., PEYCHERAN C. and AMOUROUX D. (2009): "Molybdenum and barium content in scallop shells as high resolution proxies for diazotroph and diatom dynamics in tropical coastal seawater". *Limnology and Oceanography* (54:1002-1014).
- WEFER G., BERGER W. H., BIJMA J. & FISCHER G. (1999): "Clues to ocean history: a brief overview of proxies". In *Use of proxies in paleoceanography: examples from the South Atlantic* (eds. G. Fischer & G. Wefer), Springer-Verlag, Berlin (p. 1-68).
- WENZ G. (1962): "Acoustic ambient noise in the ocean: spectra & source". *J. Acous. Soc. Am.* 34 (12).

OBSERVATION DE LA POSIDONIE PAR ACOUSTIQUE

par Jean-Pierre Hermand ⁽¹⁾

RÉSUMÉ

Les effets de la photosynthèse sur la propagation du son ont été observés dans les herbiers à Posidonie [*Posidonia oceanica* (L.) Delile]. Cet article présente les résultats d'une des expériences menées dans la réserve marine de l'île d'Ustica, au large de la Sicile, en Septembre 1999. Des mesures de propagation et de bruit ambiant ont été réalisées pendant quatre jours dans des conditions expérimentales bien contrôlées. Des signaux à bande large modulés linéairement en fréquence entre 0,2 et 16 kHz ont été transmis de manière répétée entre la source sonore et deux hydrophones distants de 53 mètres. Des données d'oxygène dissous et de température ont été également recueillies le long d'une radiale par une sonde océanographique. Une analyse statistique de la variabilité de la réponse impulsionnelle du milieu, et en particulier de la distribution temporelle de l'énergie acoustique le long de trajectoires sonores, permet d'extraire des variations cycliques de caractéristiques de propagation du son. Certaines de ces caractéristiques sont bien corrélées avec la libération d'oxygène photosynthétique. En effet, la Posidonie forme une couche épaisse dans laquelle la fraction de gaz varie avec la phase du cycle de la photosynthèse. Les principales variations sont attribuées d'une part au gaz présent dans les canaux d'air qui parcourent l'intérieur des feuilles et d'autre part à des microbulles d'oxygène qui adhèrent à leur surface. D'autres variations peuvent être attribuées à la circulation du gaz dans le rhizome et dans les réseaux de racine. Au cours de la phase active, la vitesse du son, qui est plus faible que dans l'eau de mer sans bulles, l'absorption et la diffusion modifient les réflexions multiples sur le substrat rocheux. Par la modélisation, on peut expliquer pourquoi les trajets multiples ayant des angles d'incidence intermédiaires sont les plus sensibles à la photosynthèse dans notre dispositif expérimental. Les résultats confirment ceux obtenus lors d'un premier essai en mai 1995, même si les conditions environnementales différentes et la géométrie de mesure étaient différentes. Ils indiquent que les mesures in situ de la photosynthèse par les méthodes acoustiques peuvent fournir de nouvelles perspectives pour la compréhension des mécanismes de la réponse adaptative des plantes à des facteurs environnementaux à l'échelle d'un herbier.

ABSTRACT

*The possibility of using acoustic methods to monitor in situ the response of sea grasses to environmental factors is investigated. The effects of photosynthesis on sound propagation have been observed in prairies of *Posidonia oceanica* (L.) Delile. This paper reports some results of one of the experiments conducted in the marine reserve of the island of Ustica, off Sicily, in September 1999. The long-range propagation of an acoustic signal and the ambient noise were measured during four days under well controlled experimental conditions. Low-frequency, broad-band, frequency-modulated signals were transmitted repeatedly between a sound source and a distant two-hydrophones receiver 53 m apart. The frequency range was 0.2–16 kHz. Ground truth data of dissolved oxygen and temperature were obtained along the acoustic transect with an oceanographic probe. Detailed statistical analyses of the medium impulse responses, and in particular of their energy time distribution, allow extracting cyclic variations of the sound propagation characteristics. Some of the latter are strongly correlated with the release of photosynthetic oxygen measured above the foliage by a dissolved oxygen sensor. Photosynthesis is shown to cause excess attenuation of multipaths and faster decay of reverberation. The main variations are attributed to undissolved gases that are present in the air channels running inside the length of the leaf blades and to oxygen microbubbles that stick to the blade surface. Other variations can be attributed to gas movement in the rhizome and root systems. The *Posidonia* grasses form a thick layer where gas void fraction varies with the phase of photosynthesis cycle. During the active phases, sound speeds which is lower than in bubble-free seawater, absorption and scattering modify the multiple reflections from the rock substratum. Modeling results explained why the multipaths with intermediate grazing angles are the most sensitive to photosynthesis in our experimental setup. The results confirm the ones obtained in a first test in May 1995, even if conducted under different environmental conditions and with different measurement geometry. They indicate that in situ measurements of photosynthesis by acoustic methods can provide new insights into the mechanisms and adaptive responses of sea grasses to environmental factors at the scale of a prairie.*

(1) Environmental Hydroacoustics Lab.
Université libre de Bruxelles (U.L.B.), avenue Franklin D. Roosevelt, 50 - CP 194/05, 1050 Bruxelles, Belgique. Email: jhermand@ulb.ac.be

1. INTRODUCTION

Les herbiers à Posidonie [*Posidonia oceanica* (L.) Delile] représentent le plus caractéristique et, probablement, le plus important des écosystèmes de la Méditerranée. Ils couvrent une superficie estimée à 65.000 kilomètres carrés. Ces phanérogames marines constituent un habitat important pour de nombreuses espèces de poissons, d'animaux marins, et d'autres espèces de plantes et d'algues. Ils peuvent ainsi être des indicateurs fiables de la qualité des eaux littorales et de la biodiversité du milieu marin. Ils créent également des obstacles naturels qui réduisent l'érosion côtière. Enfin, la Posidonie possède une caractéristique primordiale qui est sa faculté à produire de grandes quantités d'oxygène par photosynthèse. Pour cette raison, elle est souvent surnommée le "poumon vert de la Méditerranée". L'étude des herbiers à Posidonie, qui est une espèce protégée, et la préservation de leur superficie fait l'objet d'une attention particulière des biologistes [8].

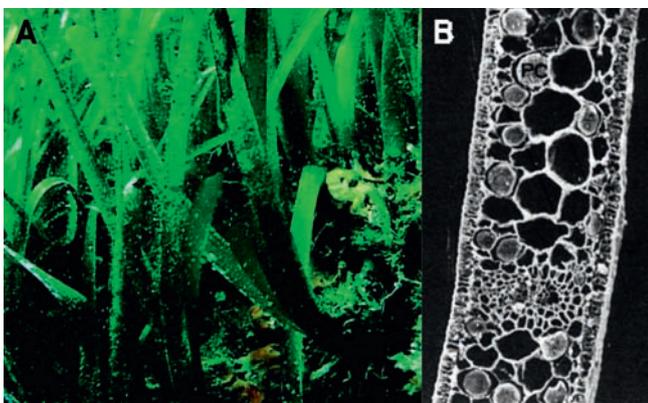


Figure 1 : Appareil à photosynthèse de la *Posidonia oceanica* L. Delile. (A) Feuilles adultes couvertes d'épiphytes et d'incrustation, jeunes feuilles et rhizomes. (B) Coupe transversale montrant l'épiderme monocouche de cellules et le mésophylle à larges cellules et les petits espaces intercellulaires ($\times 200$).

Les méthodes conventionnelles de mesure de l'activité photosynthétique des herbiers consistent à réaliser des mesures d'oxygène dissous ou des mesures de production primaire sous cloches. L'émergence des méthodes de caractérisation acoustique du milieu (communément appelé tomographie acoustique) ont permis d'envisager d'utiliser la mesure de propagation de signaux au dessus d'un herbier pour mesurer globalement et en continu sa production d'oxygène [1], [2], [3]. L'hypothèse sous-jacente est que les produits de la photosynthèse peuvent influencer sur la propagation des sons sur plusieurs dizaines ou centaines de mètres.

Cet article met l'accent sur les résultats provenant d'un essai effectué en 1999 sur un herbier à Posidonie dans une zone peu profonde à proximité du rivage de l'île d'Ustica, au large de la côte nord de la Sicile. La deuxième partie rappelle le lien entre la photosynthèse et la génération de bulles qui influent sur la propagation acoustique et qui constitue le principe de base sur lequel s'appuie ces travaux. La troisième partie présente sommairement le schéma expérimental. La quatrième partie donne une analyse des données acoustiques et l'interprétation des résultats. Les conclusions et perspectives sont tirées en fin d'article.

2. BULLES, PHOTOSYNTÈSE ET ACOUSTIQUE

2.1 Caractéristiques de *Posidonia oceanica* (L.) Delile

L'espèce objet de ces travaux est une phanérogame endémique de la mer Méditerranée. Ses longues feuilles rubanées (figure 1A) sont regroupées dans des pousses qui se développent sur divers substrats à des profondeurs d'eau variant de 10 mètres à 50 mètres. La morphologie des feuilles permet une libération maximale d'oxygène photosynthétique dans le milieu ambiant. Le limbe de la feuille se compose d'un épiderme monocouche et d'un mésophylle à 3 ou 4 couches (figure 1B). La largeur de la feuille et son épaisseur sont respectivement d'environ 1 cm et d'environ 180 μm . Le site majeur de la photosynthèse est l'épiderme, où les chloroplastes sont disposés de manière très dense dans de petites cellules allongées. La paroi externe des cellules de l'épiderme est formée par une couche extérieure continue (cuticule) et par une région poreuse sous-jacente beaucoup plus épaisse (d'environ 20 microns) avec des cavités de formes irrégulières. Le système lacunaire est constitué par des canaux interconnectés d'air au sein du mésophylle. Les dimensions particulièrement petites du système lacunaire sont une caractéristique distinctive de la Posidonie.

2.2 Oxygène photosynthétique

La photosynthèse est la principale force régissant les échanges de gaz entre l'eau de mer, les cellules de l'épiderme et le système lacunaire. En comparaison, l'activité respiratoire de la Posidonie est presque d'un ordre de grandeur plus faible et elle implique en grande partie le système lacunaire. Contrairement à d'autres plantes aquatiques, les échanges gazeux de la Posidonie avec l'eau de mer sont effectués par la diffusion moléculaire en raison de l'absence de stomates. Le processus de la consommation d'oxygène pour la respiration et la libération d'oxygène par photosynthèse est contraint par la couche limite (stationnaire) de diffusion, et dans une moindre mesure, par la cuticule et la paroi cellulaire.

La photosynthèse des herbiers à Posidonie augmente considérablement la quantité d'oxygène dissous dans la colonne d'eau. La figure 2 montre une série chronologique de 24 heures de mesures de la concentration d'oxygène à différentes profondeurs d'eau effectuées lors de l'étude d'un herbier à Posidonie de l'archipel toscan. La variabilité temporelle de la teneur en oxygène dans la colonne d'eau au dessus de l'herbier est déterminée principalement par le cycle quotidien de la productivité de l'oxygène, avec une différence entre le jour et la nuit de l'ordre de 1,5 parties par millions (p.p.m.). D'autres mesures dans cet archipel ont montré une dépendance à la profondeur et aux effets saisonniers, révélant également pour certaines des conditions de "super-saturation" sous la surface de la mer au printemps et en été [1]. Les valeurs de l'oxygène produit de plus de 10 l. m^{-2} par jour ont notamment été rapportées pour des herbiers dans cette zone.

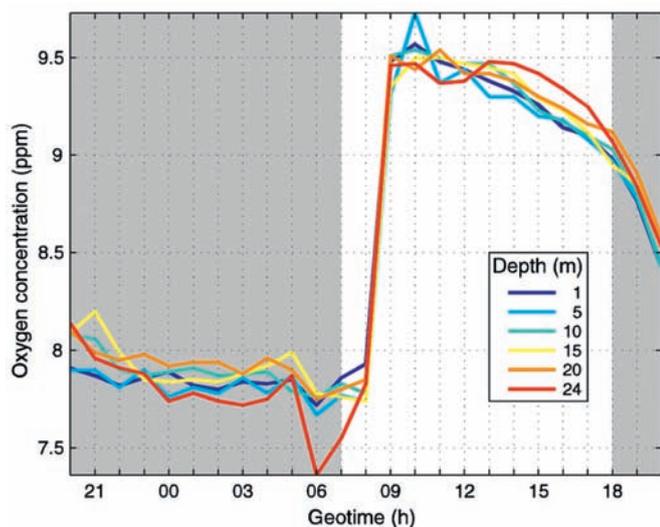


Figure 2 : Série temporelle de la concentration d'oxygène à différentes profondeurs d'eau mesurées sur un herbier à Posidonie de l'archipel toscan les 24 et 25 février 1997. Le lever du soleil et le coucher du soleil ont eu lieu respectivement à 07:00 et 18:00 heures.

2.3 Acoustique

Dans les eaux côtières, la teneur en gaz dans ses formes dissoutes et non dissoutes (bulles) est déterminée par le flux air-mer et des conditions spécifiques relatives à l'environnement et à la biomasse. Ces conditions comprennent notamment le processus de photosynthèse des plantes marines, les processus liés à la vie des animaux et à la décomposition des matières organiques. Il est bien établi que les bulles de gaz dans l'eau de mer ont une grande influence sur la propagation du son. La population de bulles est sensible aux processus physiques, chimiques et biologiques qui peuvent être très spécifiques à chaque environnement. Tel est le cas pour la photosynthèse, objet de la présente étude. La densité et la répartition du rayon des bulles varient avec la profondeur, l'heure de la journée, la saison, le vent, l'état de la mer, la turbidité, ... La présence de bulles de différentes tailles (10 - 500 μm), provoque de la diffusion, de l'atténuation et de la dispersion qui dépendent chacune de la fréquence de résonance des bulles [5]. Au dessus de la fréquence de résonance, le milieu est très atténuant et dispersif. A des fréquences inférieures à la résonance, le mélange de bulles augmente la compressibilité de l'eau réduisant ainsi la vitesse du son à une valeur inférieure à celle en l'absence de bulle. L'impact de la taille et de la proportion de bulle sur la propagation acoustique est le principe de base de l'observation tomographique de la photosynthèse, principe qui sera illustré dans la suite de cet article.

3. L'EXPÉRIENCE "USTICA'99"

3.1 Site expérimental

L'expérience "USTICA'99" a été menée sur un herbier à Posidonie (figure 3) au large de l'île d'Ustica en septembre 1999. L'île est située dans la mer Tyrrhénienne méridionale, au large de la côte nord de la Sicile, à une distance de 65 km

de Palerme (13° 10' E, 38° 42' N). Dans la zone où les expérimentations ont été conduites, les plantes poussent directement sur un substrat de basalte. Elles forment un herbier relativement dense et en bon état de conservation.



Figure 3 : Source sonore déployée sur le lit de l'herbier à *Posidonia oceanica* (L.) au large de la Sicile en septembre 1999. A noter la présence d'un banc de poissons près de la source.

3.2 Dispositif acoustique

Une source piézoélectrique et une antenne verticale de deux hydrophones distants de 53 mètres ont été mouillées dans l'herbier (figure 4). Afin de supprimer tout mouvement parasite des instruments sous des effets de courant, elles ont été fixées sur des structures rigides lestées et posées directement sur le fond. Des signaux modulés linéairement en fréquence dans la bande 200 Hz - 16 kHz ont été transmis de manière répétée entre la source et les récepteurs. La profondeur de l'eau dans la section verticale varie entre 8 m et 8,8 m. La source et les deux récepteurs ont été placés à des hauteurs respectives de 1,55 m, 0,3 m et 1,7 m au-dessus du fond. Le signal transmis est utilisé pour mesurer la réponse impulsionnelle du canal acoustique. Le signal de faible niveau et de longue durée (15,8 s), a été répété une fois par minute afin d'obtenir des statistiques suffisantes dans l'échantillonnage des processus physiques et biologiques sur les échelles de temps d'intérêt. Au final, près de trois mille signaux ont ainsi été transmis pendant quatre jours.

3.3 Mesures de l'oxygène et de l'environnement thermohalin et première corrélation avec les signaux acoustiques

Des mesures d'oxygène dissous, de température et de salinité ont été réalisées en parallèle aux mesures acoustiques. Pour obtenir un échantillonnage spatial vertical et un échantillonnage temporel de la colonne d'eau, les mesures ont consisté en une alternance de profils verticaux et de séries chronologiques au point fixe. Par exemple, la figure 5 montre la série temporelle de la concentration en oxygène dissous mesurée juste au-dessus du feuillage de la Posidonie en un point de la radiale acoustique. Afin de vérifier la corrélation entre les mesures physico-chimiques et les mesures acous-

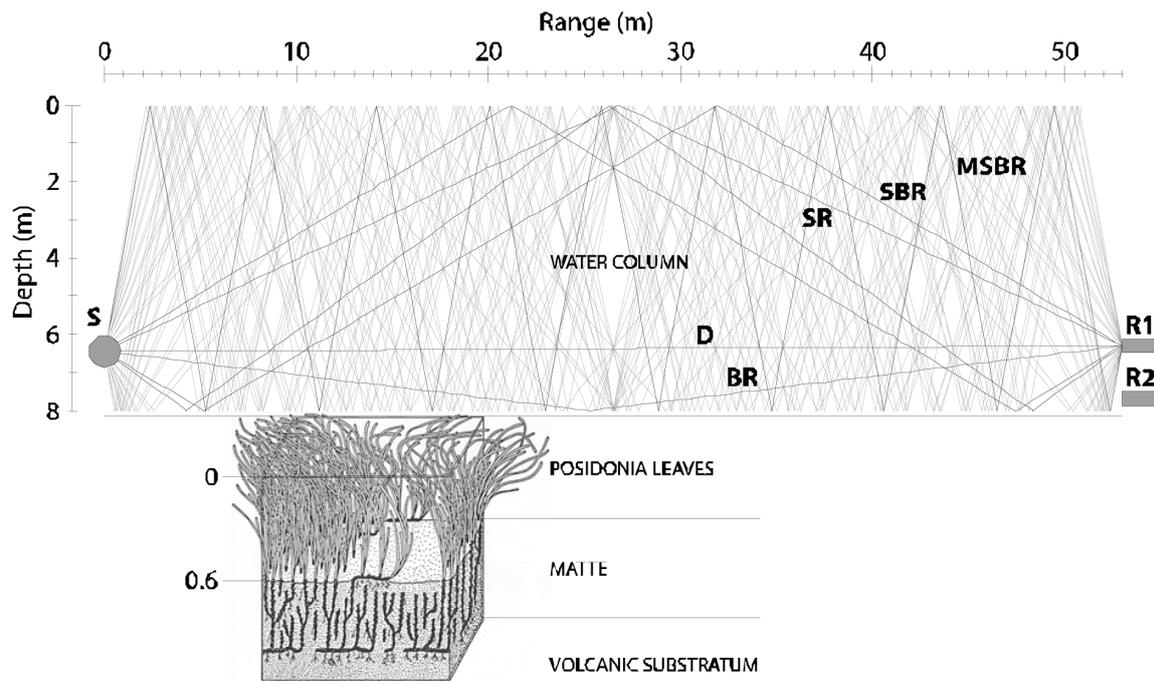


Figure 4 : Configuration expérimentale pour télédétection acoustique de l'oxygène non dissous produit par photosynthèse. Les positions de la source sonore sous-marine et les hydrophones sont repérés par S, R1 et R2. Les rayons acoustiques joignant la source S et le récepteur R1 sont classés par caractéristique de propagation [D : direct ; SR : réfléchi en surface ; BR : réfléchi au fond ("bottom") ; SBR : réfléchi en surface et au fond ; MSBR : multiples réflexions sur la surface et le fond].

tiques, on a extrait les variations de l'énergie acoustique propagée au dessus de l'herbier sur certaines trajectoires sonores. On peut noter la remarquable corrélation entre les deux courbes, confirmant ainsi les perspectives de mesure indirecte par acoustique de la production photosynthétique, perspectives que nous allons explorer plus en détail dans la suite de cet article.

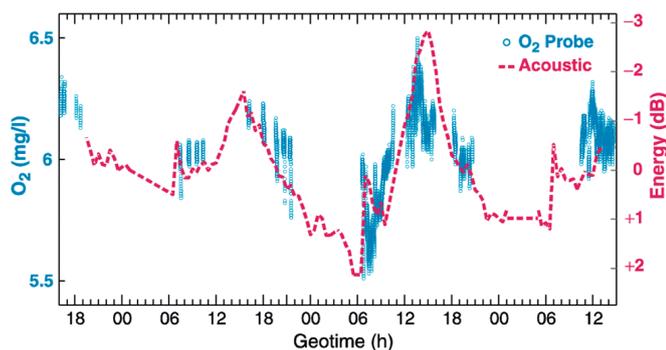


Figure 5 : Les séries chronologiques de la teneur en oxygène de l'eau de mer. Les petits cercles bleus sont des données brutes de concentration d'oxygène dissous obtenue à partir d'une sonde océanographique dont le capteur d'oxygène dissous est situé juste au-dessus du feuillage (échelle de gauche). La ligne pointillée rouge est la variation d'énergie reçue pour l'ensemble des chemins acoustiques avec 7 réflexions sur la surface et au fond (échelle de droite). (Voir aussi la figure 8).

4. ANALYSE ACOUSTIQUE DES DONNÉES ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

4.1 Analyse des données

La transmission de données acoustiques a été analysée en fonction du temps afin d'évaluer la sensibilité des signaux aux variations de tous les paramètres de l'environnement qui sont pertinents pour les fréquences acoustiques en dessous de 16 kHz. Les changements de propriétés physiques et biologiques de l'environnement ont été corrélés aux variations temporelles de la réponse acoustique du milieu, notamment au travers de la distribution de l'énergie.

La figure 6 montre la moyenne sur 4 jours de la réponse acoustique du milieu pour l'hydrophone du haut (enveloppe logarithmique). La queue de la réponse impulsionnelle (durant de l'ordre de 300 ms) correspond à l'énergie véhiculée par les rayons réfléchis en surface et au fond (MSBR) et à la diffusion aux interfaces (matte et substrat sur le fond, surface de la mer).

La figure 7 présente la variabilité globale de la réponse acoustique du milieu. Chaque courbe superposée est la différence entre la réponse impulsionnelle médiane calculée sur une demi heure et la médiane calculée sur trois nuits (enveloppe logarithmique). Le regroupement des courbes fait apparaître clairement deux régimes, un de nuit et un de jour. Le long de l'axe du temps, trois régions distinctes peuvent être identifiées. Les régions correspondent à différentes

gammas de rayons réfléchis en surface et au fond ainsi que différentes plages d'angle de rasances.

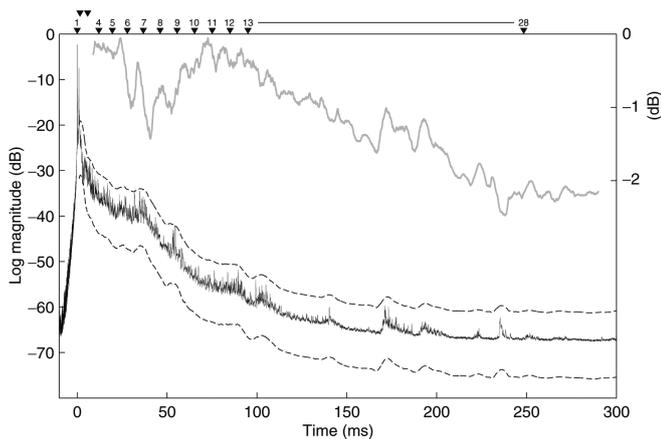


Figure 6 : Statistiques de la réponse impulsionnelle du milieu mesurée sur quatre jours sur l'hydrophone supérieur. La ligne noire est l'enveloppe journalière, calculée à partir de la médiane de l'enveloppe au carré de toutes les mesures. Les lignes en pointillés sont les centiles (lissées) 10 et 90, ce qui signifie que 80 % des courbes se trouvent entre ces allures extrêmes. La ligne grise est la différence entre les moyennes de jour et de nuit. L'origine de l'échelle de temps est donnée par la première arrivée acoustique. Les flèches indiquent, pour chaque ensemble de trajets, le nombre de réflexions sur le fond et la surface (SBR) et le temps relatif moyen prédit par un modèle de rayons.

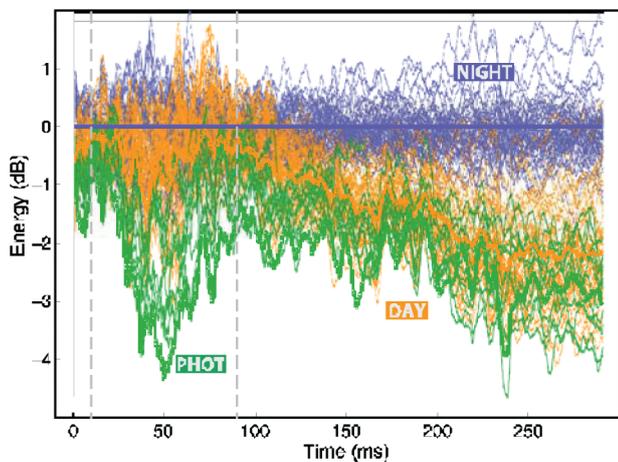


Figure 7 : Variabilité de la réponse impulsionnelle du milieu (fenêtre temporelle de 1 à 290 ms). Chaque ligne fine correspond à la différence entre les médianes des réponses impulsionnelles calculées sur une demi-heure et sur 3 nuits. Les lignes bleues correspondent aux mesures de nuit (entre 07:00 heures et 19:30 heures) sur les 4 jours. Les lignes orange correspondent aux mesures heure par heure pendant les 4 jours. Les lignes vertes correspondent aux mesures entre 13:00 heures et 16:00 heures, durant une période active de photosynthèse (sur un jour). Les lignes verticales indiquent la fenêtre de temps qui correspond à des angles de rasances intermédiaires entre 40° et 70°. Ces données sont celles de l'hydrophone du haut du 22 au 25 septembre 1999.

La première partie de la réponse acoustique (de 0 à 10 ms) correspond à des rayons directs ou comportant un nombre faible de réflexions sur la surface et le fond (moins de 3). Cette partie est moins variable que le reste de la réponse. Ceci s'explique par le fait que les trajectoires sonores "traversent" peu de fois le milieu et sont donc naturellement moins sensibles aux perturbations éventuelles. Le reste de la réponse impulsionnelle montre pour sa part une forte variabilité en terme de rapport signal à bruit sous l'effet des changements du milieu naturel.

La partie médiane de la réponse, entre 10 et 90 ms, correspond à des rayons avec des angles intermédiaires de rasance (entre 40° et 70°) et un nombre de réflexions compris entre 4 et 12. Ces trajectoires sont principalement sensibles à la réflexion et à la diffusion de l'énergie dans la direction spéculaire. A chaque réflexion, l'énergie subit l'impact de la présence de bulles. Le nombre de réflexions est suffisant pour mettre en évidence l'impact sur chaque trajectoire et d'autre part modéré pour ne pas noyer cet impact dans le bruit de fond. De plus, le fait que les réflexions ont des angles intermédiaires (en particulier en dessous de l'angle critique) assure une grande sensibilité de ces chemins à la photosynthèse par les effets combinés de la perte d'énergie due (a) à la réflexion sur un demi-espace de basalte et (b) à l'indice de réfraction de la couche d'herbe qui varie en fonction de la quantité de bulles et donc de l'activité photosynthétique [6].

Enfin, la queue du signal, de 90 à 290 ms, est dominée par la diffusion aux rasances les plus fortes. Si l'identification des trajectoires n'est plus aussi aisée, l'analyse globale des niveaux dans cette partie révèle une différence marquée entre le jour et la nuit. Il convient aussi de considérer que cette différence est biaisée par la variation naturelle du bruit ambiant biologique [6].

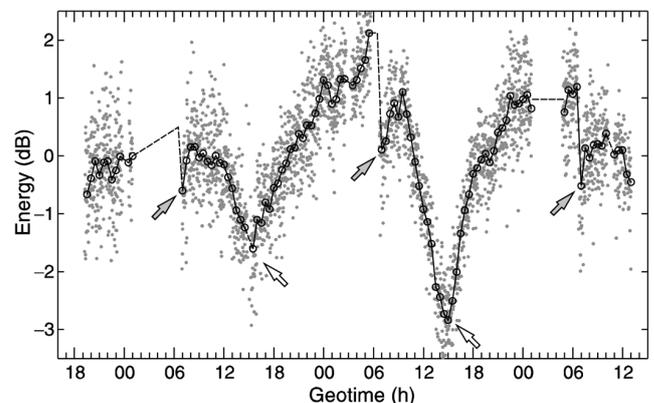


Figure 8 : Variation d'énergie de la réponse du milieu acoustique en fonction du temps. La fenêtre de temps d'intégration est de 35 à 45 ms, correspondant aux rayons ayant 7 réflexions à la surface et au fond. En gris : données brutes. Les cercles et les lignes correspondent à l'énergie médiane sur une demi-heure. Les flèches grises et blanches correspondent aux maxima des phases de respiration et de photosynthèse respectivement.

La figure 8 montre la variation en fonction du temps de l'énergie reçue pour l'ensemble des chemins acoustiques ayant 7 réflexions en surface et au fond, ce qui correspond à un angle de rasance moyen de 61°. La courbe de l'énergie,

gie, renversée dans le sens vertical, est reproduite en figure 5 pour une comparaison directe. La similitude de forme entre les séries temporelles d'oxygène dissous et le suivi acoustique est remarquable. Le minimum d'énergie, bien marqué à 15 heures, correspond à la concentration maximale d'oxygène à proximité du feuillage (flèches blanches). A contrario, le maximum d'énergie coïncide avec le minimum de concentration d'oxygène à 6 heures. La différence d'énergie de 5 dB entre 6 heures et 15 heures représente une atténuation supérieure d'environ 0,7 dB par rebond sur le fond. Un minimum d'énergie local a été constamment observé à 7 heures pour les trois jours (flèches grises), ce qui correspond au minimum de concentration d'oxygène à la fin de la phase respiratoire. On a remarqué également un excès d'atténuation que l'on peut attribuer au flux concomitant de gaz vers les rhizomes et les racines, comme il sera expliqué dans la section suivante.

4.2 Interprétation des résultats

Une analyse approfondie des données montre que les principales variations d'énergie acoustique, observées sur une échelle journalière, étaient indépendantes du cycle des marées et des changements de conditions de vent et de température sous la surface de l'eau [6]. En particulier, les petits changements du profil de vitesse du son dans la colonne d'eau ne contribuent pas de manière significative aux variations acoustiques diurnes. Ces dernières s'expliquent en effet principalement par le changement de la proportion de gaz dans la couche de plantes. Ces mécanismes d'échanges gazeux ne s'appliquent d'ailleurs pas seulement à la Posidonie, mais sont régis de manière générale par le mouvement gazeux dans les herbiers [7].

Comme le tissu photosynthétique est concentré dans l'épiderme, les cellules épidermiques sont le siège d'une accumulation d'oxygène lorsque l'on passe de l'obscurité à la lumière. Le gradient de diffusion qui en résulte provoque une diffusion de l'oxygène vers le système lacunaire et le milieu ambiant. En début de processus, sous faible luminosité, l'oxygène s'accumule dans la paroi poreuse sous la cuticule et dans les petits espaces d'air du mésophylle. Cela provoque une augmentation de la concentration en oxygène et de la pression dans le limbe de la feuille. Cette mise en pression initiale provoque un écoulement transitoire du gaz du système lacunaire vers les rhizomes et les racines. Puis, avec le rayonnement croissant, l'oxygène commence à se diffuser dans l'eau de mer et les bulles qui se forment adhèrent à la feuille. Alors que les grosses bulles de gaz dans l'eau ont normalement tendance d'une part à éclater en raison de la diffusion gazeuse forcée par la tension de surface ou d'autre part à remonter rapidement à la surface en raison de leur flottabilité, l'apport continu en oxygène dans le cas de la Posidonie combiné à l'effet d'adhérence permettent de maintenir une grande proportion de bulles d'oxygène à proximité du fond de la mer, en plus de l'oxygène présent dans la paroi poreuse et la présence de gaz dans le système lacunaire. La séquence d'événements décrite ci-dessus est en tout point compatible avec les observations acoustiques qui établissent un lien de cause à effet entre le cycle quotidien de photosynthèse et les principales variations acoustiques observées, à savoir, les minima et les maxima absolus représentés en figure 8. Par ailleurs, le flux de gaz vers les

rhizomes et les racines lorsque la luminosité augmente et l'inverse lors de la disparition de la lumière modifie la proportion de vide dans la matte. C'est ce qui explique les minima locaux de la figure 8.

5. CONCLUSION

Les résultats expérimentaux présentés dans cet article montrent que les produits de la photosynthèse par la Posidonie ont un impact sur la transmission du son dans la colonne d'eau au dessus d'un herbier de Posidonie. L'analyse des variations temporelles de certaines caractéristiques du canal acoustique, comme en particulier l'atténuation énergétique le long de trajectoires sonores bien choisies, révèle l'existence d'un cycle journalier. Les principales variations diurnes s'expliquent par la diffusion en fonction du temps et de l'absorption de l'énergie acoustique dans la plante et dans la matte. Durant le jour, où l'irradiance est suffisante, des bulles d'oxygène se forment par photosynthèse sur le limbe et des échanges gazeux se font au sein de la matte. Les mouvements de gaz au dessus de l'herbier et en son sein interagissent avec l'énergie acoustique propagée au dessus de l'herbier et réfléchi sur le substrat rocheux. L'analyse de ces interactions permet de dresser les bases d'une méthode d'observation acoustique d'un herbier. A ce stade, les résultats permettent d'établir un lien de cause à effet entre la photosynthèse et les variations acoustiques. La suite naturelle de ce travail sera de poser et résoudre le problème inverse, c'est-à-dire de remonter aux paramètres physico-chimiques de la photosynthèse à partir des mesures tomographiques.

AVERTISSEMENT

Certaines parties de ce travail ont été publiées par l'auteur en langue anglaise sous la référence [6].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] HERMAND J-P, NASCETTI P. and CINELLI F.: "Inversion of acoustic waveguide propagation features to measure oxygen synthesis by *Posidonia oceanica*", in *Proceedings of the Oceans '98 IEEE/OES Conference* (C. O. Committee, ed.) (vol. II, (Piscataway, NJ), pp. 919–926, IEEE, Sept. 1998).
- [2] HERMAND J-P., NASCETTI P. and CINELLI F.: "Inverse acoustical determination of photosynthetic oxygen productivity of *Posidonia* sea grass" (Dordrecht, pp. 125–144, Kluwer Academic, June 2000).
- [3] NASCETTI P.: "Rilievi stagionali e circadiani della produzione di ossigeno di praterie di *Posidonia oceanica* in supporto ad uno studio di inversione acustica". *Tesi di laurea in scienze biologiche*, Facoltà di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali, Genova, 1998.
- [4] COLOMBO P., RASCIO N. and CINELLI F.: "*Posidonia oceanica* (L.) Delile: A structural study of the photosynthetic apparatus". *Marine Ecology* (vol. 4, no. 2, pp. 133–145, 1983).

[5] CLAY C. S. and H. MEDWIN H. *Acoustical Oceanography: Principles and Applications*. New York: Wiley, 1977.

[6] HERMAND J-P.: "Acoustic remote sensing of photosynthetic activity in sea grass beds", in *Scaling Methods in Aquatic Ecology. Measurement, Analysis, Simulation* (L. Seuront and P. G. Strutton, eds., chapter 5, pp. 65–96, Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, 2004).

[7] LARKUM A., Mc COMB A. and SHEPHERD S.: "*Biology of Sea grasses*". New York: Elsevier, 1989.

[8] BOUDOURESQUE C. F., BERNARD G., BONHOMME P., CHARBONNEL E., DIVIACCO G., MEINESZ A., PERGENT G., PERGENT-MARTINI C., RUITTON S. et TUNESI L. : "Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*". (Ramoge, pub. 1-202, n° ISBN 2-905540-30-3, 2006).

DEUXIÈME PARTIE

MISSION OCÉANOGRAPHIQUE DU PACIFIQUE

(13 janvier 2000 – 27 juillet 2001)

par Michel Even, ingénieur en chef de l'armement, directeur de la MOP

SOMMAIRE

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE	10-3
1.1 Introduction	10-3
1.2 Cadre général	10-3
1.3 Physionomie de l'activité, points marquants	10-3
2. TRAVAUX RÉALISÉS	10-3
2.1 En Nouvelle-Calédonie	10-4
2.2 A Wallis et Futuna	10-5
2.3 En Polynésie française	10-5
3. ORGANISATION, MOYENS	10-8
3.1 Organisation	10-8
3.2 Personnel	10-8
3.3 Locaux	10-9
3.4 Véhicules	10-9
3.5 Moyens flottants	10-9
3.6 Moyens aériens	10-10
3.7 Systèmes	10-10
3.8 Logiciels et informatique	10-11
4. MÉTHODES	10-11
4.1 Géodésie par GPS	10-11
4.2 Spatiopréparation et stéréopréparation	10-11
4.3 Hydrographie en zone corallienne	10-11
5. BILAN ET PERSPECTIVES	10-11
5.1 En Nouvelle-Calédonie	10-11
5.2 En Polynésie française	10-12
ANNEXE I : Références des rapports particuliers	10-13
ANNEXE II : Localisation des travaux	10-15
Iles Tuamotu (ouest)	
Iles Tuamotu (est)	
Iles Gambier	
Iles de la Société	
Iles Australes (ouest)	
Iles Australes (est)	
Nouvelle-Calédonie	

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE

1.1 Introduction

Ce rapport couvre l'activité de la mission océanographique du Pacifique (MOP) durant la période du 13 janvier 2000 au 27 juillet 2001, sous la direction de l'ingénieur en chef de l'armement Michel Even.

Il présente les travaux réalisés par la MOP pendant cette période, y compris le traitement des travaux antérieurs qui n'avaient pas été achevés par les directeurs techniques précédents, les travaux menés pendant la période qui n'ont pu être finalisés avant le 27 juillet 2001, et plus marginalement la préparation des travaux dont les opérations à la mer ou sur le terrain n'avaient pas commencé le 27 juillet 2001.

1.2 Cadre général

Les missions de la MOP sont concentrées sur l'amélioration de la connaissance hydrographique dans les eaux du Pacifique sous juridiction française. Elles contribuent à la fois aux missions du service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM) de service hydrographique national et de soutien en environnement marin pour la défense.

Depuis le départ du bâtiment hydrographique de 2^e classe (BH2) *Laplace* de Nouméa pour Brest en 1999, l'échelon calédonien ne dispose plus de moyen hauturier en propre ou mis à disposition, limitant son rayon d'action à des travaux littoraux. Une coopération étroite avec le Territoire a été initiée en 1999. Un projet de convention entre la marine et le Territoire de Nouvelle-Calédonie a été préparé. Le fait qu'il n'ait pas encore été signé à l'été 2001 n'a pas été un obstacle à la mise en œuvre d'actions concrètes : ainsi la base hydrographique de Nouvelle-Calédonie (BHNC) a emménagé en février 2001 dans des locaux de la direction des infrastructures, de la topographie et des transports terrestres (DITTT), et un levé a pu être réalisé avec le baliseur polyvalent *Eugène Morignat* du service des phares et balises. La création d'une commission hydrographique en Nouvelle-Calédonie permet de faciliter le recensement des besoins et d'orienter l'activité de la BHNC - même si le programme annuel reste ordonné par le SHOM vers des besoins des différents acteurs du Territoire au profit par exemple de son développement économique ou de la protection de ses ressources (balisage des réserves marines par exemple).

En Polynésie française, la MOP dispose encore avec le BH2 *Arago* et ses vedettes hydrographiques (VH) de moyens lui permettant aussi bien d'intervenir par grands fonds que d'hydrographier des voies recommandées dans les lagons ou de lever un site de plageage, même si les systèmes employés ne se situent pas toujours à la pointe de l'innovation.

Selon la loi organique de 1996, le Territoire assume les responsabilités relatives à la sécurité de la navigation « dans les eaux intérieures », notamment les lagons, tandis que l'État en reste responsable hors des eaux intérieures. La coopération avec le Territoire vise donc à aider celui-ci à prendre en charge progressivement ses responsabilités plutôt qu'à mettre en commun des ressources pour des objectifs communs comme en Nouvelle-Calédonie. Dans un premier temps, le Territoire a donc fait former à l'hydrographie deux

techniciens polynésiens, à l'école des hydrographes du SHOM à Brest. A l'issue d'un complément de pratique à la MOP, ils ont reçu leur qualification FIG-OHI catégorie B.



Remise des diplômes FIG-OHI catégorie B aux deux hydrographes polynésiens

Sur les deux sites, et depuis déjà plusieurs années, la MOP réalise des travaux « d'hydrographie civile », en réponse à des besoins qui ne seraient pas couverts par « l'hydrographie générale » liée à la sécurité de la navigation. Cela concerne aussi bien l'hydrographie portuaire que la définition de voies d'accès dans les lagons pour les paquebots de croisière ou vers des sites miniers pour des navires minéraliers. Encadrés par des protocoles et donnant lieu à redevance, ils témoignent de l'importance de l'hydrographie pour l'aménagement des Territoires et de la nécessité du développement de la coopération hydrographique avec ceux-ci.

1.3 Physionomie de l'activité, points marquants

Les activités notables de la MOP ont été :

- le développement de la coopération, dans les deux Territoires,
- la réalisation des travaux de géodésie, spatiopréparation et stéréopréparation, notamment pour permettre l'établissement des lignes de bases droites sur lesquelles s'appuient de nombreuses limites de juridiction maritime,
- la réalisation de levés dans le cadre de conventions onéreuses (port autonome de Nouvelle-Calédonie, levé dans le lagon de Tahaa pour la navigation des paquebots de croisière, ...),
- le soutien de la défense, avec la réalisation de levés de plageage,
- le « nettoyage » des cartes marines hors des eaux intérieures en Polynésie française, encore sous responsabilité de l'État (voir §1.2), en recherchant de nombreux hauts-fonds douteux,
- la réalisation, tant que la Polynésie française ne dispose pas des moyens pour le faire, de quelques levés d'hydrographie générale jugés importants.

2. TRAVAUX RÉALISÉS

Les levés réalisés ont fait l'objet de rapports particuliers (listés en annexe I) et ne sont donc présentés ici que de manière synthétique. L'annexe II présente la localisation des principaux travaux.

2.1 En Nouvelle-Calédonie

2.1.1 Levés d'hydrographie civile

Travaux hydrographiques dans la petite rade du port de Nouméa (S200102300)

Suite à de nombreux dragages, et à la demande des pilotes maritimes, la BHNC a réalisé le levé hydrographique de la petite rade de Nouméa, en vedette et en coralline, de janvier 1999 à février 2000. Ces travaux ont été conduits dans le cadre de la convention permanente entre le SHOM et le port autonome de Nouvelle-Calédonie (PANC) et ont permis une mise à jour de la carte marine 6633 pour la zone de manœuvre et les quais.

Positionnement du balisage délimitant les réserves marines naturelles de la Province Sud (S200103400)

Le balisage des réserves spéciales du parc du lagon Sud, du parc du lagon de Bourail, la réserve spéciale de l'île Ténia, les réserves spéciales de la baie de Prony (réserve de l'îlot Casy et réserve de l'Aiguille), soit 45 bouées ou balises, a été contrôlé par la BHNC d'octobre 1999 à juin 2000. Ces réserves sont instaurées par arrêtés du Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, préparés par le service de l'environnement de la Province Sud et publiés au Journal Officiel de la Nouvelle-Calédonie, et l'inscription des réserves marines sur les cartes du SHOM avait déjà été évoquée à maintes reprises et souhaitée par l'ensemble des membres de la commission nautique, tant pour la sécurité de la navigation que pour la connaissance des périmètres de réserves marines par le public.

Les travaux ont été réalisés avec les moyens de la BHNC (embarcation pneumatique) ou avec la vedette de travail *Améré*, appartenant au service de la mer de la Province Sud.

2.1.2 Spatiopréparation et stéréopréparation

Stéréopréparation des îles Walpole, Matthew et Hunter (S200106100 et S200106200)

La stéréopréparation des îles Walpole, Matthew et Hunter a été réalisée en avril 2000 en coopération avec la DITTT et l'institut de recherche pour le développement (IRD), à partir de photographies aériennes réalisées par l'aéronavale (Gardian de l'escadrille 9S), et avec le soutien du bâtiment de transport léger (BATRAL) *Jacques Cartier* et de deux hélicoptères Puma. Les résultats obtenus devraient servir lors de l'établissement des lignes de bases droites pour les revendications des eaux sous juridiction française.

En octobre 2000, une nouvelle campagne, avec le soutien du *Jacques Cartier*, un hélicoptère Panthère de la frégate *Prairial* et deux hélicoptères Puma de l'escadron de transport d'outre-mer (ETOM) 52, a permis de compléter les travaux sur Walpole.

Spatiopréparation des récifs de l'Astrolabe et du récif Pétrie (S200107900)

Les récifs de l'Astrolabe, à l'est de la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie sont utilisés pour fixer les lignes de bases droites utilisées pour la délimitation du domaine mari-

time. Ils sont mal connus et seuls quelques bancs de sable émergent. Des prises de vues aériennes lors d'un vol de reconnaissance par Gardian ont facilité l'identification de points stationnables identifiables sur les zooms d'images SPOT. Les travaux de spatiopréparation ont été réalisés en novembre 2000 puis complétés en février 2001, à chaque fois avec le concours d'un patrouilleur P400.

2.1.3 Levés au profit des forces

Contrôle bathymétrique à Koumac et reconnaissance de sites de plageage potentiels entre la baie de Gomen et la baie de Néhoué (S200104100)

Les travaux réalisés en juillet et août 2000 en embarcation pneumatique et avec la VH8 de la BHNC ont permis de contrôler le plageage de Koumac-Pandop et d'effectuer une reconnaissance bathymétrique et visuelle d'autres sites potentiels de plageage, entre la baie de Gomen et la baie de Néhoué.

Reconnaissances de sites de plageage à Fayaoué (Ouvéa) (S200204200) et en baie de Uala (île Art - Belep) (S200204100)

Réalisés à la demande du BATRAL *Jacques Cartier* et avec son support, les travaux ont permis de montrer qu'aucun des 5 sites demandés à Fayaoué ni des 4 autres proposés en baie de Uala n'était adapté.



Reconnaissance de plages avec le support du BATRAL *Jacques Cartier*

2.1.4 Levés d'hydrographie générale

Levé de voies recommandées aux abords de Nouméa, tronçon 1 au 109°/289° (S200303300)

Le levé de la voie recommandée et le positionnement du balisage situé à ses abords ont été réalisés de mai à août 2001. C'est le premier levé réalisé avec des moyens mis à disposition par la DITTT, en l'occurrence son baliseur polyvalent *Eugène Morignat*. Compte tenu du type de navire utilisant ce chenal et de la présence de nombreuses remontées, un seuil de navigation a été défini (à 12 m), pour limiter les travaux de recherche au nécessaire et suffisant.

2.2 À Wallis et Futuna

Pendant la période objet du présent rapport, aucun levé n'a été réalisé à Wallis et Futuna.

2.3 En Polynésie française

2.3.1 Levés d'hydrographie générale

Travaux hydrographiques complémentaires à Kauhei (S200003800)

Réalisés du 13 mai 1999 au 1^{er} mars 2000 avec le BH2 *Arago* et ses vedettes, les travaux réalisés dans l'atoll de Kauhei, dans l'archipel des Tuamotu, ont permis :

- de compléter le levé à l'extérieur de la passe,
- de rechercher des relèvements potentiels détectés par imagerie SPOT,
- de déterminer le trait de côte aux abords de la passe.

Travaux hydrographiques à Makemo, de la passe Arikitamiro au mouillage du village de Pouheva (S200003900)

Les travaux réalisés sur l'atoll de Makemo, dans l'archipel des Tuamotu, avaient pour but d'assurer la définition et l'investigation d'une voie d'accès dans le lagon par la passe Arikitamiro à la zone de mouillage de Pouheva. Entamés en 1999, les compléments ont été achevés en mars 2000. Ce levé a également permis de rattacher l'atoll au réseau géodésique de Polynésie française (RGPF) par rapport à la borne Doris de l'atoll d'Anaa.

Travaux hydrographiques à Rurutu (S200004000)

Les travaux réalisés sur l'île de Rurutu, dans l'archipel des îles Australes, avec le BH2 *Arago* en juin 1999 et janvier 2000 ont permis de définir une zone de mouillage dans la baie de Moerai et son accès depuis le large. Les sondages ont par ailleurs démontré que la baie d'Avera n'était quant à elle pas favorable au mouillage. Un dossier de spatiopréparation a également été produit.

Le levé de reconnaissance autour de l'île par fonds de l'ordre de 2 500 m a montré une bonne cohérence avec le levé réalisé peu après par l'*Atalante* dans le cadre du programme de zone économique de Polynésie française (ZEPOLYF).

Contrôle bathymétrique de la passe d'Avatoru, à Rangiroa (S200004600)

Le contrôle bathymétrique de la passe d'Avatoru, permettant l'accès au quai, a été réalisé les 23 et 24 avril 2000 par les vedettes du BH2 *Arago*.

Contrôles bathymétriques de la passe Tuheiava et du chenal jusqu'au mouillage de Tuherahera, dans l'atoll de Tikehau, dans l'archipel des Tuamotu (S200005100)

Les travaux réalisés en mars et avril 2000 avec le BH2 *Arago* et ses vedettes ont consisté à lever la passe Tuheiava et le chenal depuis la passe jusqu'au mouillage du village de Tuherahera.

L'atoll et celui de Mataiva ont été rattachés au RGPF par rapport à Rangiroa.

Géodésie à Raraka et travaux hydrographiques à Motu Tunga : passe Motu Tunga, mouillage et spatiopréparation (S200100700)

Commencés en novembre 1998 pour être achevés en mars 2000, les travaux ont été menés avec le BH2 *Arago* et un hélicoptère Puma, et ont consisté en :

- de la géodésie et spatiopréparation,
- le levé de la passe et la recherche d'un seuil,
- la recherche, vaine, d'une zone de mouillage.

L'atoll de Raraka, comme celui de Motu Tunga, a été rattaché au système géodésique RGPF par GPS (global positioning system) par rapport à la station Doris d'Anaa.

Travaux hydrographiques à Katiu : Passe Pakata, mouillage et quai d'Hitianau (S200100800)

Après avoir rattaché l'atoll de Katiu au RGPF, le levé de l'accès au quai d'Hitianau a été réalisé en 1999 et 2000 avec le BH2 *Arago* et ses vedettes.

Contrôle bathymétrique des abords et du port de Temao, sur l'île de Makatea, dans l'archipel des Tuamotu (S200101000)

Le « port de Temao » n'est qu'une darse accessible uniquement en embarcations. Il constitue cependant l'unique point d'accès maritime de l'île. Son levé a été réalisé en mars et avril 2000 en vedette et coralline. Des trajectographies GPS et une stéréorestitution récupérée auprès du Territoire ont permis la constitution d'un dossier de spatiopréparation.

Travaux hydrographiques aux abords du quai d'Uturoa, île de Raiatea (Archipel de la Société, Polynésie française) (S200102200)

Les travaux réalisés sur l'île de Raiatea sont les compléments finaux d'un levé effectué en 1998, la construction de nouveaux quais n'ayant été achevée qu'en 2000. Le levé des abords des quais principaux, très fréquentés par les paquebots de croisière, et de l'accès à la darse du port d'Uturoa a été réalisé en octobre 2000 en vedette.

Travaux hydrographiques à Moorea, Iles du Vent (S200102500)

En septembre 2000, les vedettes du BH2 *Arago* et la coralline ont permis une hydrographie complète des baies de Afareaitu et Haumi et de la passe de Teruaupu. La passe de Tepapaurau, permettant l'accès à la baie de Afareaitu depuis l'extérieur du lagon n'a pu être correctement hydrographiée compte tenu de la présence permanente d'un déferlement pendant les travaux.

Travaux complémentaires dans la passe Teavanui à Bora-Bora (S200103300)

A l'occasion du passage du BH2 *Arago*, des travaux complémentaires à un levé de 1999 ont été menés pour statuer sur des sondes pour lesquelles persistait un doute.

Contrôle bathymétrique des passes sud-est et sud-ouest et définition de voies recommandées aux îles Gambier (S200106700)

Les travaux aux îles Gambier ont été menés à l'occasion de deux missions du BH2 *Arago* de juin à août 2000. Ils ont consisté à contrôler l'accès au lagon par les passes sud-est et sud-ouest et relier celles-ci à la voie recommandée levée en 1997 par de nouvelles voies recommandées. Dans les passes, l'exploitation du sonar latéral a été rendue difficile du fait de la nature des fonds, recouverts de petites formations coralliennes difficilement identifiables individuellement (et dont l'estimation de la hauteur est donc peu précise). Comme souvent dans les lagons de Polynésie, des voies à seuil de navigation ont été définies. Une spatiopréparation a également été réalisée.

Travaux hydrographiques à Rimatara (S200200100)

Les travaux réalisés à Rimatara, dans l'archipel des îles Australes avaient pour but d'assurer la définition de trois zones de mouillage à l'est, au nord et à l'ouest de l'île, et de compléter la spatiopréparation réalisée en 1999. Réalisés en février et mars 2001 avec le BH2 *Arago* et ses vedettes, ils ont permis de montrer que seules deux des zones étaient adaptées au mouillage, ce qui a pu être confirmé par les pratiques locales.

Recherche de hauts-fonds dans les archipels des Gambier et des Tuamotu (S200200200)

A l'occasion de transits vers diverses zones de levés, le BH2 *Arago* a effectué des levés sur divers hauts-fonds de Polynésie. Les cartes bathymétriques produites par l'université française du Pacifique (UPF) par compilation de données bateau et d'altimétrie satellitale ont constitué une aide appréciable. Par exemple, une sonde de 400 m carte marine n'existait pas (fonds de 3 360 m) mais un sommet plus court (à 340 m) a été trouvé à proximité, où la carte de l'UPF indiquait une remontée importante.

Les levés ont montré que de nombreuses sondes, un symbole « eaux décolorées », et même un récif pourtant nommé (récif Bertero) n'existaient pas.

Recherche de hauts-fonds douteux dans l'archipel de la Société (S200200400)

Des brisants à l'ouest de l'atoll de Manuae, ainsi qu'une sonde de 340 m au nord de Maupiti ont été recherchés avec le BH2 *Arago* en mars 2001. Ces sondes apparaissaient sur les cartes marines et avaient été signalées en 1890 pour les brisants et 1976 pour le 340 m. Les brisants n'avaient pas été retrouvés en 1902 et l'exploitation des données d'altimétrie satellitale ne donnait aucun indice de présence du 340 m. Ces deux remontées n'ont pas été retrouvées en 2001 et les cartes marines mises à jour.

Reconnaissance bathymétrique des îlots Morotiri, levé des sondes douteuses localisées au large de ces îles, archipel des Australes Sud (S200206300)

Dans l'extrême sud-est de la Polynésie française, les îlots Morotiri, servent à la délimitation de la zone économique

exclusive. Leur rattachement au RGPF et leur spatiopréparation ont été conduits avec le BH2 *Arago* et ses vedettes en février 2001. La houle rendant l'accès aux îlots impossible, les travaux ont été conduits en effectuant une trajectographie en vedette autour de certains d'entre eux, à distance faible et constante.

La recherche de sondes douteuses et un levé de reconnaissance ont par ailleurs été réalisés, mais la navigation reste dangereuse compte tenu de la présence de nombreux îlots.



Reconnaissance bathymétrique autour des îlots Morotiri (Australes)

Travaux hydrographiques au large de Rapa (archipel des Australes) (S200300500) et sur le banc Président Thiers (S200300900)

Les levés réalisés en février et mars 2001 par le BH2 *Arago* et ses vedettes ont permis d'améliorer la connaissance des bancs Neilson, Maaki, Président Thiers et de sondes douteuses par grands fonds.

Travaux hydrographiques en baie d'Haurei, île de Rapa, archipel des Australes (S200301100)

En février et mars 2001, avec le BH2 *Arago*, la MOP a réalisé le levé d'accès à la baie d'Haurei au cours duquel de nombreuses sondes plus courtes que celles portées sur la carte marine ont été trouvées.

Un dossier de spatiopréparation a été rédigé.

Levé bathymétrique en transit en 2000 (S200303400)

Les transits réalisés par le BH2 *Arago* ont été mis à profit pour acquérir la bathymétrie. La rédaction est annuelle.

2.3.2 Rattachements au RGPF et spatiopréparation

Géodésie et spatiopréparation aux îles Australes

Conduits en 1999 avec le BH2 *Arago* et un P400 (patrouilleur de la marine), le levé a permis de rattacher au RGPF les îles de Rimatara, Maria et Raivavae par rapport aux stations Doris de Tubuai et Rurutu. Les spatiopréparations de Rimatara, Maria, Raivavae et Tubuai ont également été réalisées.



Le BH2 *Arago* à Rapa (panoramique)

Géodésie et spatiopréparation de l'atoll de Mataiva (S200100900)

Accessible uniquement par une passe pour navigation, l'atoll de Mataiva n'est pas navigable dans son lagon intérieur. Les travaux de rattachement géodésique au RGPF par rapport à Rangiroa et de spatiopréparation ont été réalisés le 6 mars 2000.

Rattachement géodésique et spatiopréparation de l'atoll de Niau (archipel des Tuamotu) (S200101100) et reconnaissance des approches de deux points de débarquement et compléments de spatiopréparation à Niau (S200202100)

L'atoll de Niau a été rattaché au RGPF par GPS statique par rapport à la borne Doris de Apataki en 1999. Les travaux de spatiopréparation réalisés n'auront permis qu'une vérification, cet atoll apparaissant sur la même image SPOT que l'atoll de Toau, ayant déjà fait l'objet d'une spatiorestitution. En mai 2001 ont été conduits des travaux complémentaires de spatiopréparation et géodésie, et l'implantation d'un marégraphe en préparation du levé des abords des points de débarquement (Niau étant un atoll fermé pour lequel le ministère de l'équipement et des ports de Polynésie française envisageait d'équiper de coffres d'amarrage pour les goélettes assurant le ravitaillement).

Géodésie et spatiopréparation des atolls de Pinaki, Nukutavake, Ahunui, Akiaki, Vahitahi, Vairaatea, Pukarua, Reao et Manuae (S200103000)



Géodésie et spatiopréparation aux Tuamotu en Super Puma

Une campagne de géodésie et spatiopréparation, d'une durée de 5 jours en novembre 2000, a été conduite dans l'archipel des Tuamotu avec le concours d'un Super Puma. Basée à Nukutavake, où se trouve une borne Doris, l'équipe s'est rendue sur 7 atolls voisins pour y réaliser le rattachement au RGPF et la spatiopréparation. L'emploi de l'hélicoptère a permis de traiter deux atolls chaque jour, et surtout d'accéder facilement à ceux ne possédant pas d'accès maritime.

En décembre 2000, ce même moyen a été employé pour réaliser le rattachement et la spatiopréparation de Manuae, l'atoll le plus à l'ouest de l'archipel de la Société.

Géodésie et spatiopréparation des atolls de Takaroa, Napuka, Tepoto, Pukapuka, Fangatau, Fakahina, Tatakoto et Mehetia (S200103200)

Une campagne de géodésie et spatiopréparation a été conduite avec le concours du P400 *La Tapageuse* en novembre 2000. Elle a permis de rattacher au RGPF 6 atolls des Tuamotu par rapport à la station Doris de Napuka, et l'île de Mehetia (archipel de la Société) par rapport à Tahiti. A l'exception de Takaroa, toutes ces îles ont fait l'objet d'une spatiopréparation.

Rattachement géodésique et spatiopréparation de l'atoll de Maiao (archipel de la Société) (S200105300)

L'atoll de Maiao a été rattaché au RGPF par GPS par rapport à Tahiti. A cette occasion, l'équipe débarquée pour la journée du BH2 *Arago* a effectué une spatiopréparation de l'atoll.

Géodésie et spatiopréparation des atolls de Morane, Temoe, Matureivavao, Vahanga, Tenararo, Tenarunga, Marutea Sud et Maria (S200106500)

Réalisée en mai 2001 avec le concours d'un hélicoptère Super Puma, la campagne menée dans les Tuamotu de l'est et les îles Gambier a permis de positionner dans le RGPF et d'effectuer la spatiopréparation de 8 atolls dont certains participent à la définition des limites de la zone économique exclusive.

2.3.3 Hydrographie civile

Levé d'un chenal de « circumnavigation » dans le lagon de Tahaa - Raiatea (Archipel de la Société - Îles sous le Vent) (S200203000)

Dans le cadre du développement touristique, le Territoire de Polynésie française souhaitait disposer d'un chenal de « cir-

cumnavigation » pour les paquebots de croisière dans le lagon de Tahaa. Ces travaux dépassant le simple besoin de l'hydrographie générale, un protocole, fixant la redevance à payer par le Territoire a été conclu.

Les travaux débutés en 1998 et 1999 ont été poursuivis le long de la côte est de Tahaa depuis la pointe Rauoi sur la côte nord-ouest de Tahaa à la pointe du Roi Tamatoa, sur la côte est : une voie recommandée, avec des seuils de navigation différents selon les zones, a été établie. Le levé de la passe Toahotu (Tahaa), non inclus dans les travaux définis par le protocole mais prévu au plan triennal 2000-2002 de la MOP a également été réalisé à cette occasion pour profiter des infrastructures mises en place pour le levé du chenal.

Levé d'une voie recommandée dans le lagon de Fakarava (archipel des Tuamotu), du village de Rotoava à la passe de Tumakohua (S200301200)

Dans la perspective d'éventuelles évacuations sanitaires du village de Tetamanu, situé au sud de l'atoll de Fakarava vers l'aérodrome, le Territoire de Polynésie française a souhaité disposer d'un chenal de navigation à l'intérieur du lagon. Commencés en juin 2001, dans le cadre d'un protocole d'accord avec le SHOM, le levé a permis de définir une nouvelle voie recommandée, avec un seuil de navigation, l'ancienne voie de navigation n'étant plus praticable du fait de l'implantation de fermes perlières.



Levé d'une voie recommandée dans les passes de Fakarava

3. ORGANISATION, MOYENS

3.1 Organisation

L'organisation de la MOP résulte principalement des évolutions liées au retour vers Brest, en août 1999 du BH2 *Laplace*, basé à Nouméa. Cette réduction de moyens en Nouvelle-Calédonie s'est accompagnée d'une diminution importante du plan d'armement sur ce territoire.

La nouvelle organisation a été fixée le premier janvier 2000. La MOP était constituée :

- de la base hydrographique de Nouvelle-Calédonie (BHNC), implantée à Nouméa et disposant d'embarcations légères et d'une vedette hydrographique,

- de l'unité hydrographique de Polynésie française (UHPF), implantée à Papeete et employant le BH2 *Arago* pour réaliser des levés dans toute la Polynésie.

Dans cette nouvelle organisation, le BH2 *Arago* n'est plus au sein de la MOP, comme c'était le cas jusqu'alors.

Le 26 décembre 2000, l'organisation a de nouveau évolué :

- la MOP comprend de nouveau l'*Arago*,
- l'UHPF et la BHNC relèvent organiquement du SHOM avec une tutelle du COMAR PF (commandant de la marine de Polynésie française).

Le service logistique de la MOP assure le soutien de la BHNC et de l'UHPF. Bien que l'ingénieur électronicien chef du service (basé à Papeete) se rende régulièrement à Nouméa, la BHNC souffre de son éloignement du service logistique de la MOP et du service chargé de l'entretien des sondeurs et sonars latéraux (DCN Papeete).

Le major, chef de la BHNC, assure également un rôle de représentation du directeur auprès des autorités locales.

3.2 Personnel

L'effectif théorique de la MOP n'a pas évolué pendant la période :

BHNC (Unité 19404)			
Spécialité	Grade	Qualification	Nombre
HYDRO	MJR	CHYDROSUP	1
	MP	CSURSECPLONG	1
	PM	CPROGRAMSUP CSURSECPLONG	1
MECAN	SM	CPLONGEUR	1
MANEU	SM	CPLONGEUR	1
Total			5

UHPF (Unité 19403)			
Spécialité	Grade	Qualification	Nombre
HYDRO	ICA		1
HYDRO	IPA		1
LOG	I1ETA		1
HYDRO	MP	CHYDROSUP	1
	PM	CPROGRAMSUP	1
	PM		2
	MT	CPLONGEUR	2
	MT		1
MANEU	SM	CAIDHYDRO	1
RADIO	PM	CELECTRONI	1
INFSY	MT		1
RADEC	CTN	ACONDUVL	1
ELECT	QMT	ACONDUVL	1
MECAN	SM	CPLONGEUR	1
	CTN		1
	CTN	ACONDUVL	1
DESSI	CTN		1
SECRE	SM		1
EQUIP	CTN	AMENUISIER	1
Total			21

Cet effectif théorique a globalement été honoré, tant quantitativement que qualitativement.

En Nouvelle-Calédonie, l'absence de soutien logistique *in situ* peut rendre très pénalisantes des avaries mêmes relativement mineures (tests de matériels après le passage à l'an 2000 par exemple). Les déplacements de l'ingénieur chef du service logistique depuis Tahiti sont coûteux (en frais de mission et en potentiel car d'une durée d'au moins une semaine) et, compte tenu de son activité principalement rythmée par l'emploi du BH2 *Arago*, ne peuvent se concevoir qu'avec une planification importante et non à la demande.

Une évolution du plan d'armement en Nouvelle-Calédonie sera nécessaire pour pouvoir employer de façon optimale les nouveaux moyens nautiques dont devrait s'équiper le territoire (vedette et baliseurs hydrographiques).

3.3 Locaux

Le rapprochement entre les services territoriaux de Nouvelle-Calédonie et la MOP a été concrétisé par le déménagement le 12 février 2001 de la BHNC dans de nouveaux locaux de la DITTT sur le même site que la subdivision des phares et balises. Ces locaux sont neufs et fonctionnels, et ont été conçus en concertation avec la BHNC ; le site dispose également d'un accès au lagon, très pratique pour les moyens nautiques. Ils sont cependant éloignés de la base navale, ce qui occasionne des trajets relativement longs.



Implantation des locaux communs BHNC/DITTT

En Polynésie, la MOP dispose de locaux très fonctionnels répartis en centre ville (immeuble Bir Hakeim), et, pour la partie logistique sur la presqu'île de Motu Uta.

3.4 Véhicules

La MOP est correctement dotée en véhicules.

A l'UHPF, les besoins sont limités, les déplacements routiers étant circonscrits à l'île de Tahiti.

La BHNC est quant à elle équipée de 4x4 Toyota, son domaine d'intervention par la route couvrant toute la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie. Ces véhicules sont adaptés aux besoins, permettant notamment le transport d'embarcations sur remorque et l'accès à des points de mise à l'eau, ou à

des sites d'installation de stations différentielles GPS, parfois desservis par des pistes peu praticables. Le projet de convention avec le Territoire prévoit que le remplacement des véhicules soit à sa charge.



Véhicule 4x4 Toyota bien adapté aux besoins de la BHNC

3.5 Moyens flottants

3.5.1 Le BH2 *Arago* et ses vedettes hydrographiques

Le BH2 *Arago* est affecté en Polynésie depuis 1991. Il aura effectué 126 jours d'activité hydrographique en 2000 et 124 en 2001.

Pendant la période objet du présent rapport, sa disponibilité aura été globalement bonne. Celle de ses vedettes hydrographiques aura aussi été satisfaisante, malgré leur ancienneté.

3.5.2 BATRAL et P400

Les travaux ne nécessitant pas de moyens de sondage (spatiopréparation, géodésie, ...), sont parfois réalisés avec le concours de bâtiments de la marine, en particulier en Nouvelle-Calédonie, où la BHNC ne dispose pas d'un BH2. La MOP a bénéficié des concours suivants :

	BHNC		UHPF	
	2000	2001	2000	2001
BATRAL	10 jours	/	/	/
Frégate	3 jours	/	/	/
P400	3 jours	5 jours	11 jours	5 jours

3.5.3 La vedette hydrographique de la BHNC et les corallines

Le moyen nautique principal de sondage de la BHNC a été la vedette hydrographique *Popinée*. Malgré son âge avancé, sa disponibilité a été globalement bonne, notamment grâce à un soutien efficace de la base navale de Nouméa. Le déclassement de *Dawa*, la deuxième vedette laissée par le BH2 *Laplace* à son départ en 1999, a fourni des pièces de rechange bien utiles pour *Popinée*, compte tenu des difficultés d'approvisionnement liées à l'ancienneté du moteur. L'investissement du Territoire dans de nouveaux moyens

(voir §3.5.4) permettra d'assurer une relève à cette vedette en fin de vie, et de disposer d'un moyen plus facilement transportable.

La BHNC est également équipée d'une petite et d'une grande coralline.



La vedette hydrographique *Poppinée* de la BHNC

3.5.4 Les moyens de la Nouvelle-Calédonie

La MOP a participé à l'intégration de spécifications hydrographiques dans le cahier des charges du futur baliseur afin qu'il puisse consacrer une partie de son activité dédiée à l'hydrographie en Nouvelle-Calédonie. Le marché de sa construction a été attribué en juin 2001.

La participation du Territoire à la fourniture de moyens a déjà commencé en mai et juin 2001 avec la mise à disposition du baliseur polyvalent *Eugène Morignat*, du service des phares et balises, pour la réalisation d'un levé de voies recommandées aux abords de Nouméa.



Le baliseur polyvalent *Eugène Morignat*

En avril 2000, la DITTT a émis une expression de besoin pour une embarcation hydrographique transportable par la route. Son achat n'a pas été retenu lors de la session supplémentaire du budget 2000 de la Nouvelle-Calédonie en août 2000 et devait être représenté en août 2001.

3.6 Moyens aériens

L'avion (pour des reconnaissances aériennes) et surtout l'hélicoptère constitue des moyens complémentaires permettant de rejoindre des sites difficilement accessibles par la mer (atolls sans passe, ...). Ils ont été fortement employés par les deux échelons de la MOP, et notamment en Polynésie à l'occasion de deux missions de plusieurs jours pour la spatiopréparation de nombreux atolls :

	BHNC		UHPF	
	2000	2001	2000	2001
Fennec	3,2 h	/	/	
Puma	33,2 h	/	/	
Super Puma	/	/	19,2 h	32,35 h
Casa	/	/	2,5 h	
Guardian	3,3 h	3,5 h	7,1 h	7,8 h

3.7 Systèmes

3.7.1 Localisation

En Polynésie française comme en Nouvelle-Calédonie, les besoins de localisation ont été quasi exclusivement couverts par du GPS.

Les levés hydrographiques ont été positionnés par :

- du GPS naturel dans les zones très au large (par exemple pour les recherches de hauts-fonds douteux avec le BH2 *Arago*)
- du GPS différentiel (DGPS), la station de référence étant permanente (station HF de Mandjélia en Nouvelle-Calédonie) ou installée selon les besoins (stations UHF).

Le système Axyle, plus précis mais plus contraignant à mettre en œuvre (nécessité d'installer plusieurs balises à terre) n'a été employé que pour les levés portuaires, requérant une grande précision horizontale.

Les travaux géodésiques ou les trajectographies réalisées à l'occasion des nombreuses spatiopréparations ont été effectués avec des GPS Ashtech MD-12 et Z-12, qui, bien que n'étant pas des générations les plus récentes, ont donné satisfaction.

3.7.2 Bathymétrie

Sondeurs monofaisceaux

Les deux échelons de la MOP étaient équipés de sondeurs Atlas Deso 20 et Simrad EA300P. Ces derniers étaient dédiés aux travaux en coralline et ont été assez peu utilisés.

Si la disponibilité des sondeurs Deso 20 a été satisfaisante pour l'UHPF, elle fût médiocre pour la BHNC et n'a pas dépassé 35 % sur toute la période. De mars à décembre 2000, l'activité hydrographique a été fortement perturbée par cette indisponibilité. Les délais d'acheminement (jusqu'à 2 mois pour un envoi de Nouméa à Papeete) et les allers-retours multiples (certains sondeurs de retour de réparation ne fonctionnant que quelques heures) vers les ateliers de réparation de la direction des constructions navales (DCN)

de Papeete se sont avérés très pénalisants. La situation s'est améliorée au dernier trimestre 2000, la BHNC ayant été équipée de Deso 17.

Sonars latéraux

Les sonars latéraux ont été globalement disponibles, hormis quelques avaries (principalement sur les poissons 272 TD et les câbles de 50 m). L'entretien de ces systèmes est assuré par DCN Papeete, et se heurte, comme pour les sondeurs, aux délais d'acheminement pouvant être parfois longs. Des solutions d'échange de matériel entre les deux échelons de la MOP ont été mises en œuvre pour limiter les perturbations engendrées sur l'activité.

Le sonar latéral est, pour l'hydrographie dans les eaux du Pacifique, un système indispensable et complémentaire du sondeur vertical. La présence potentielle de structures coralliennes remontant brutalement du fond et constituant un danger pour la navigation impose sa mise en œuvre pour la plupart des levés. Son maintien en condition opérationnelle est donc un élément déterminant pour l'activité hydrographique de la MOP.

3.8 Logiciels et informatique

Les logiciels d'acquisition et de traitement de la bathymétrie étaient AQIDOC et TRADOC. Ils ont connus quelques avaries et anomalies (défauts de topage, numérisation de bandes impossible, ...), qui ont fait la preuve, s'il en était besoin, de l'importance de disposer d'un programmeur sur chaque site.

4. MÉTHODES

La MOP étant équipée de systèmes ayant été déjà largement éprouvés dans les missions métropolitaines (et pour certains ayant été remplacés par des systèmes plus modernes), les méthodes de travail ont été déjà rodées et ne présentent pas d'innovation notable.

L'environnement des zones de travail (atolls inaccessibles, fonds coralliens, ...) conduit cependant probablement à développer un savoir-faire particulier qui peut ensuite, via le personnel, rayonner dans les missions métropolitaines.

4.1 Géodésie par GPS



MOP et équipage de Super Puma

En Polynésie française en particulier, l'étendue de la zone, les difficultés d'accès, et la relative jeunesse du système géodésique (le réseau de points Doris constituant la base du RGPF n'a été installé qu'au cours de la dernière décennie), ont nécessité des travaux d'extension du réseau pour presque tous les travaux conduits par l'UHPF. Souvent réalisés dans un contexte « d'urgence » lié à la disponibilité des moyens aériens (potentiel limité de l'hélicoptère) ou nautiques (missions conduites à l'occasion de « tournée des îles » de P400), le succès des campagnes de rattachement au RGPF repose sur une très bonne maîtrise du GPS par le personnel.

4.2 Spatiopréparation et stéréopréparation

L'UHPF a effectué de nombreux travaux de spatiopréparation, souvent communes avec les campagnes de rattachement au RGPF et donc dans les conditions décrites au §4.1. Là encore, le personnel a pu développer son savoir-faire et mettre en œuvre des techniques sinon originales du moins peu pratiquées, comme la trajectographie en hélicoptère positionné par GPS. Comme pour les trajectographies à pied, elle consiste à suivre une limite caractéristique (frontière végétation/sable par exemple) identifiable sur l'image SPOT, et à la positionner précisément.

La BHNC n'a pas été en reste même si elle a effectué plus de stéréopréparations que de spatiopréparations.

4.3 Hydrographie en zone corallienne

Que ce soit en Nouvelle-Calédonie ou en Polynésie française, les levés hydrographiques sont réalisés dans des endroits toujours potentiellement encombrés de remontées coralliennes. Les levés hydrographiques sont donc quasiment exclusivement réalisés en vedette (pour ne pas engager le BH2 *Arago* dans des zones à risque) avec le sondeur vertical et le sonar latéral en fonction simultanément. Que ce soit pour la mise en œuvre ou pour le traitement, le personnel ne manque pas d'occasion de maintenir ou d'améliorer son savoir-faire. L'expérience acquise notamment dans la corrélation des données des deux systèmes permet une aide à la décision quant aux travaux complémentaires (recherches, intercalaires, ...) à réaliser.

L'abondance de remontées de fond coralliennes impose parfois des travaux de recherche disproportionnés par rapport à l'usage qui sera fait du levé : la définition de voies recommandées avec seuil, très pratiquée à la MOP, permet alors de répondre au besoin.

5. BILAN ET PERSPECTIVES

5.1 En Nouvelle-Calédonie

Avec un très grand lagon et des nouveaux besoins en hydrographie qui apparaissent en fonction notamment du développement économique, la nécessité de moyens nautiques de sondage transportables est renforcée. Depuis le départ du BH2 *Laplace*, la BHNC n'a plus de possibilité d'action d'ampleur ailleurs qu'aux abords immédiats de Nouméa. La mise en œuvre de la vedette hydrographique sur un site éloigné impose la disponibilité d'un bâtiment pour la transporter,

puis de disposer *in situ* d'infrastructures aptes à accueillir une équipe et les moyens de traitement.

Par ailleurs, l'effectif réduit de la BHNC ne permet pas de mener simultanément l'exécution et le traitement de plusieurs levés. Pour ne pas prendre de retard sur la rédaction et afin d'achever le maximum de levés avant les relèves du personnel hydrographe, il conviendra d'organiser le fonctionnement de la BHNC de façon à limiter le nombre de levés en cours. L'équilibre sera de toute façon fragile car toujours soumis à des demandes imprévues.

Bien qu'elle n'ait pas encore été contractualisée par une convention, l'implication du Territoire dans l'hydrographie est manifeste : mise à disposition de locaux, prise en compte des spécifications hydrographiques dans les futurs moyens nautiques du service des phares et balises. Elle permet d'envisager l'avenir de la BHNC avec optimisme. L'arrivée de nouveaux moyens devra être suffisamment anticipée pour augmenter en conséquence les effectifs afin de pouvoir optimiser leur emploi.

L'isolement de la BHNC en soutien logistique reste son point faible. Un rééquilibrage avec l'UHPF sera à étudier dans le cadre de l'évolution à venir en Polynésie (voir §5.2).

5.2 En Polynésie française

Le départ du BH2 *Arago* vers la métropole ayant été annoncé, pour une échéance à court terme, la question du devenir de l'échelon polynésien de la MOP se pose.

Contrairement à la Nouvelle-Calédonie, où les besoins se concentrent principalement dans le lagon de la Grande Terre et sont donc généralement accessibles soit par route soit par le lagon, l'hydrographie en Polynésie requiert un bâtiment support :

- tant pour les levés par grands fonds, domaine de responsabilité de l'État,
- que pour les sondages dans les eaux intérieures, sous responsabilité du Territoire. Hors de l'île de Tahiti, le transport de moyens aptes à travailler dans les lagons, passes, et abords des îles ne peut se faire qu'avec un navire hauturier. Par ailleurs, les conditions d'installation à terre d'une équipe qui serait laissée en autonomie avec une vedette ne seront généralement pas adaptées : les moyens de traitement, indispensables *in situ* ne serait-ce que pour contrôler le travail de la journée, nécessitent des locaux climatisés et une alimentation électrique suffisante qui ne sont pas disponibles dans la majorité des îles de Polynésie française. La sécurité du personnel mettant en œuvre les vedettes déjà anciennes du BH2 *Arago* dans des zones isolées et dangereuses (comme des passes par exemple) est également à prendre en compte.

Le Territoire de Polynésie semble avoir pris la mesure de ses nouvelles responsabilités en s'engageant dans la formation de personnel hydrographe. Si le maintien d'une entité du SHOM, au moins pour aider le Territoire à prendre en charge progressivement l'hydrographie dans ses eaux intérieures, semble nécessaire, l'adaptation de ses ressources humaines et de ses nouvelles missions à la réduction de ses moyens devra être effectuée en cohérence avec la coopération qui se met en place. Un transfert de ressources vers l'échelon de Nouvelle-Calédonie permettrait d'accompagner le développement de moyens qui s'y prépare.

Annexe I : Références des rapports particuliers

Intitulé	N° du levé	Référence du rapport particulier
Nouvelle-Calédonie		
Travaux hydrographiques dans la petite rade du port de Nouméa	S200102300	N° 34 MOP/NP du 02 février 2001
Positionnement du balisage délimitant les réserves marines naturelles de la Province Sud	S200103400	N°230 MOP/NP du 21 novembre 2000
Contrôle bathymétrique à Koumac et reconnaissance de sites de plageage potentiels entre la baie de Gomen et la baie de Néhoué	S200104100	N° 224 MOP/.. du 16 novembre 2000
Spatio Préparation des récifs de l'Astrolabe et du récif Pétrie	S200107900	N° 146 MOP/NP du 12 juillet 2001
Stéréopréparation des îles Walpole, Matthew et Hunter	S200106100	N° 192 MOP/NP du 3 octobre 2000
Stéréopréparation à l'île Walpole (compléments)	S200106200	N° 124 MOP/NP du 18 juin 2001
Reconnaissance de sites de plageage en baie de Uala (île Art, Belep)	S200204100	N° 49 MOP/ NP du 21 février 2002 (achevé par l'ICA Paillet)
Reconnaissance de sites de plageage à Fayaoué (îles Loyauté, Ouvéa)	S200204200	N° 48 MOP/ NP du 21 février 2002 (achevé par l'ICA Paillet)
Levé de voies recommandées aux abords de Nouméa – Tronçon 1 au 109°/289°	S200303300	N°147 du 27 juillet 2002 (achevé par l'ICA Paillet)
Polynésie française		
Travaux hydrographiques complémentaires à Kauhei	S200003800	N° 136 MOP/NP du 22 mai 2000
Travaux hydrographiques à Makemo, de la passe Arikitamori au mouillage du village de Pouheva	S200003900	N° 110 MOP/NP du 28 avril 2000
Travaux hydrographiques à Rurutu	S200004000	N° 111 MOP/NP du 28 avril 2000
Géodésie et spatio Préparation aux îles Australes	S200004500	N° 153 MOP/NP du 15 juin 2000
Contrôle bathymétrique de la passe d'Avatoru, à Rangiroa	S200004600	N° 165 MOP/NP du 28 juillet 2000
Contrôles bathymétriques de la passe Tuheiava et du chenal jusqu'au mouillage de Tuherahera, dans l'atoll de Tikehau, dans l'archipel des Tuamotu	S200005100	N° 159 MOP/NP du 26 juillet 2000
Géodésie à Raraka et travaux hydrographiques à Motutunga : passe Motutunga, mouillage et spatio Préparation	S200100700	N° 222 MOP/NP du 14 novembre 2000
Travaux hydrographiques à Katiu : Passe Pakata, mouillage et quai d'Hitianau	S200100800	N° 223 MOP/NP du 14 novembre 2000
Géodésie et spatio Préparation de l'atoll de Mataiva	S200100900	N° 19 MOP/NP du 16 janvier 2001
Contrôle bathymétrique des abords et du port de Temao, sur l'île de Makatea, dans l'archipel des Tuamotu	S200101000	N° 234 MOP/NP du 1 décembre 2000
Rattachement géodésique et spatio Préparation de l'atoll de Niau (archipel des Tuamotu)	S200101100	N° 249 MOP/NP du 15 décembre 2000
Travaux hydrographiques aux abords du quai d'Uturoa, île de Raiatea (Archipel de la Société, Polynésie française)	S200102200	N° 18 MOP/NP du 16 janvier 2001
Travaux hydrographiques à Moorea, Iles du Vent	S200102500	N° 235 MOP/NP du 4 décembre 2000
Géodésie et spatio Préparation des atolls de Pinaki, Nukutavake, Ahunui, Akiaki, Vahitahi, Vairaatea, Pukarua, Reao et Manuae	S200103000	N° 32 MOP/NP du 31 janvier 2001
Géodésie et spatio Préparation des atolls de Takaroa, Napuka, Tepoto, Pukapuka, Fangatau, Fakahina, Tatakoto et Mehetia	S200103200	N° 248 MOP/NP du 13 décembre 2000
Travaux complémentaires dans la passe Teavanui à Bora-Bora	S200103300	N° 93 MOP/NP du 20 avril 2001
Rattachement géodésique et spatio Préparation de l'atoll de Maiao (archipel de la Société)	S200105300	N° 126 MOP/NP du 19 juin 2001
Géodésie et spatio Préparation des atolls de Morane, Temoe, Matureivavao, Vahanga, Tenararo, Tenarunga, Marutea Sud et Maria	S200106500	N° 207 MOP/NP du 13 septembre 2001 (achevé par l'ICA Paillet)

Intitulé	N° du levé	Référence du rapport particulier
Contrôle bathymétrique des passes sud-est et sud-ouest et définition de voies recommandées aux îles Gambier	S200106700	N° 1 MOP/NP du 3 janvier 2001
Travaux hydrographiques à Rimatara	S200200100	N° 131 MOP/NP du 4 juillet 2001
Recherche de hauts-fonds dans les archipels des Gambier et des Tuamotu	S200200200	N° 139 MOP/NP du 6 juillet 2001
Recherche de hauts-fonds douteux dans l'archipel de la Société	S200200400	N° 129 MOP/NP du 4 juillet 2001
Reconnaissance des approches de deux points de débarquement et compléments de spatiopréparation à Niau (archipel des Tuamotu)	S200202100	N° 262 MOP/NP du 22 novembre 2001 (achevé par l'ICA Paillet)
Levé d'un chenal de "circumnavigation" dans le lagon de Tahaa - Raiatea (Archipel de la Société - Îles sous le Vent)	S200203000	N° 3 MOP/NP du 4 janvier 2001
Reconnaissance bathymétrique des îlots Morotiri, levé des sondes douteuses localisées au large de ces îles, archipel des Australes sud	S200206300	N° 267 MOP/NP du 27 novembre 2001 (achevé par l'ICA Paillet)
Travaux hydrographiques au large de Rapa, archipel des Australes	S200300500	N° 133 MOP/NP du 2 juillet (achevé par l'ICA Paillet)
Travaux hydrographiques sur le banc Président Thiers (archipel des Australes)	S200300900	N° 95 MOP/NP du 2 mai (achevé par l'ICA Paillet)
Travaux hydrographiques en baie d'Haurei, île de Rapa, archipel des Australes	S200301100	N° 275 MOP/NP du 13 décembre 2001 (achevé par l'ICA Paillet)
Levé d'une voie recommandée dans le lagon de Fakarava (archipel des Tuamotu), du village de Rotoava à la passe de Tumakohua	S200301200	N° 44 MOP/NP du 19 février 2002 (achevé par l'ICA Paillet)
Levé bathymétrique en transit en 2000	S200303400	N° 35 MOP/NP du 14 février 2002 (achevé par l'ICA Paillet)

Annexe II : Localisation des travaux

Les planches suivantes présentent la répartition géographique des travaux réalisés au cours de la période couverte par ce rapport.

Les symboles utilisés sont :



ou



: levé hydrographique

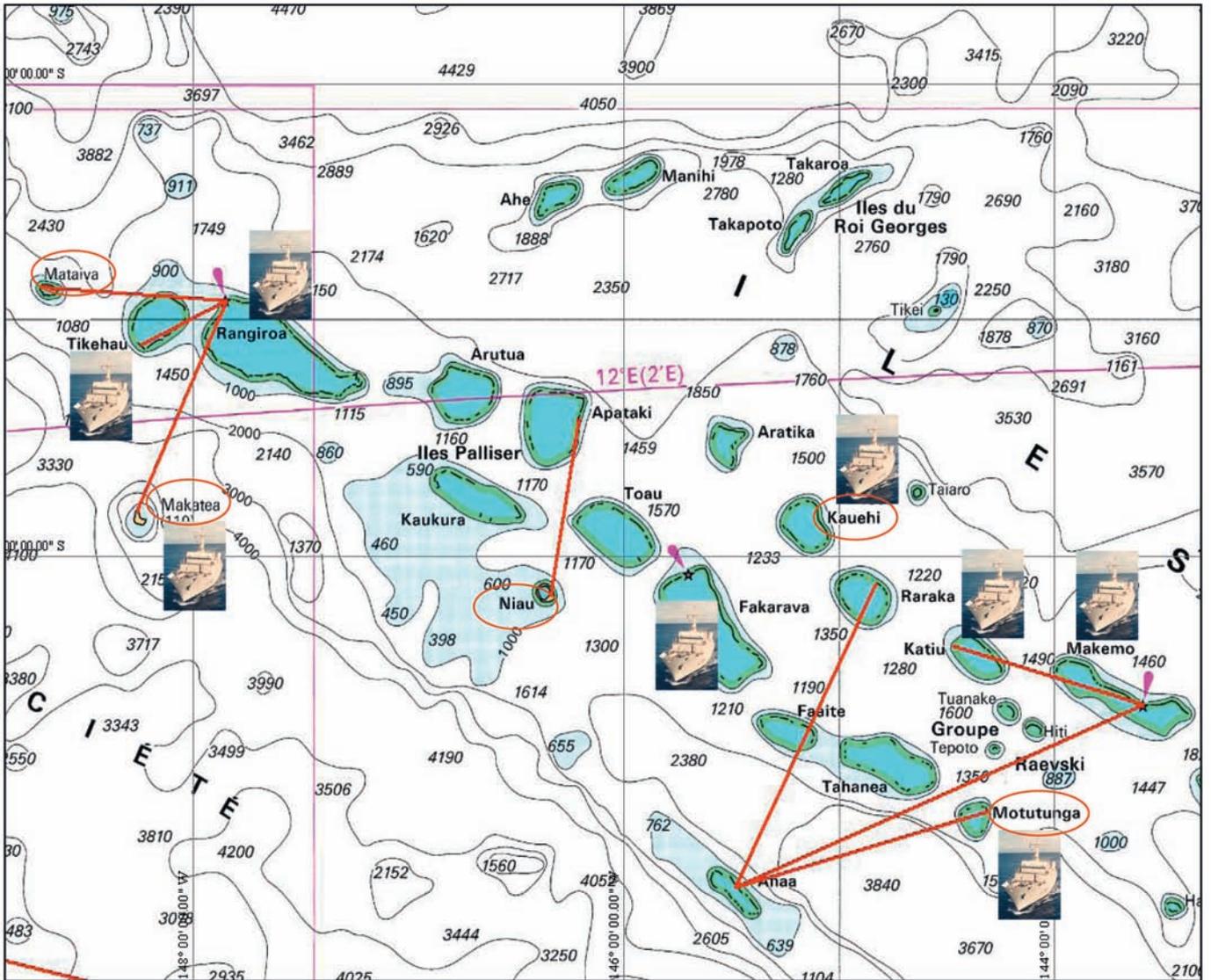


: spatiopréparation ou stéréopréparation

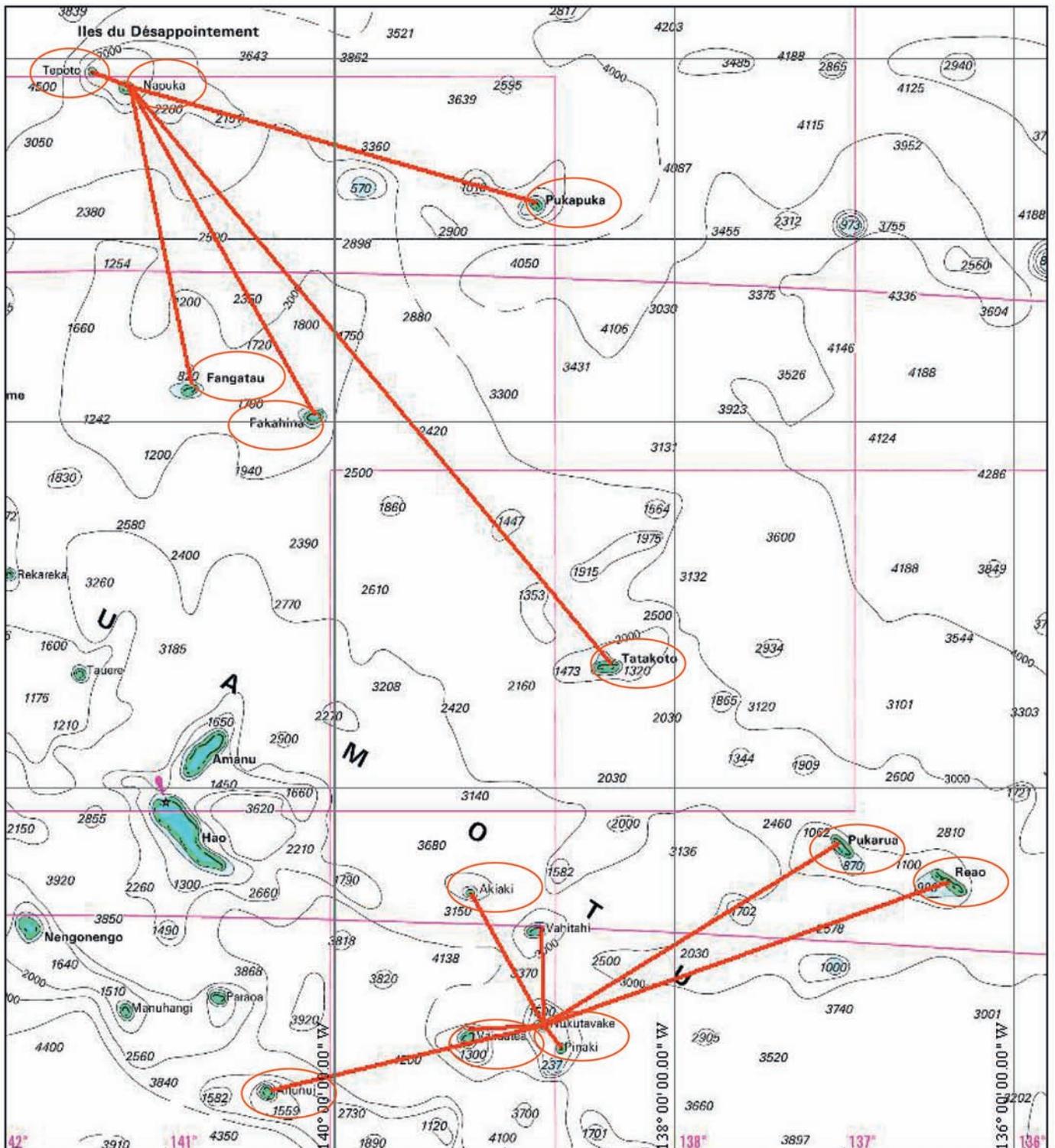


: rattachement au RGPF

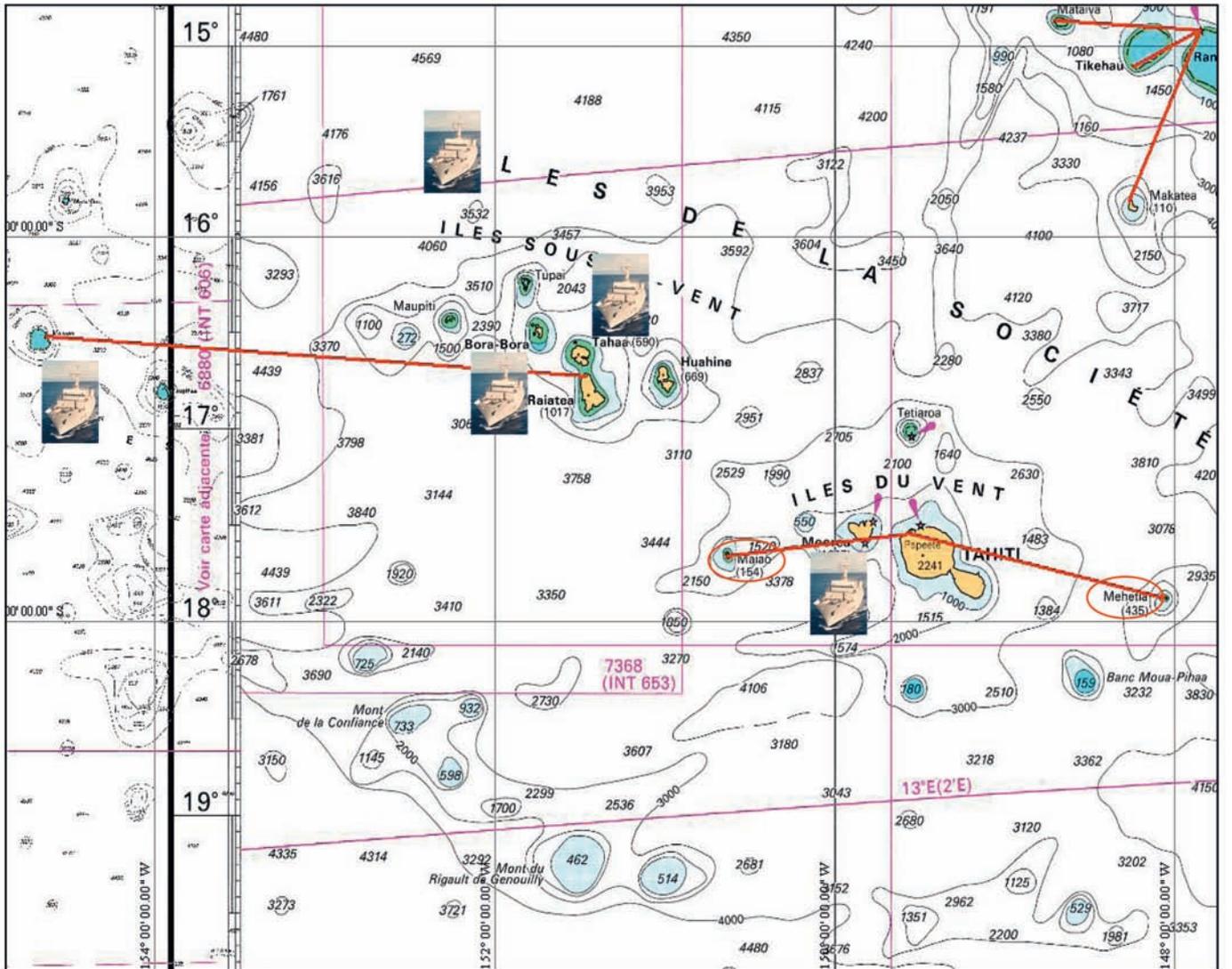
Îles Tuamotu (ouest)



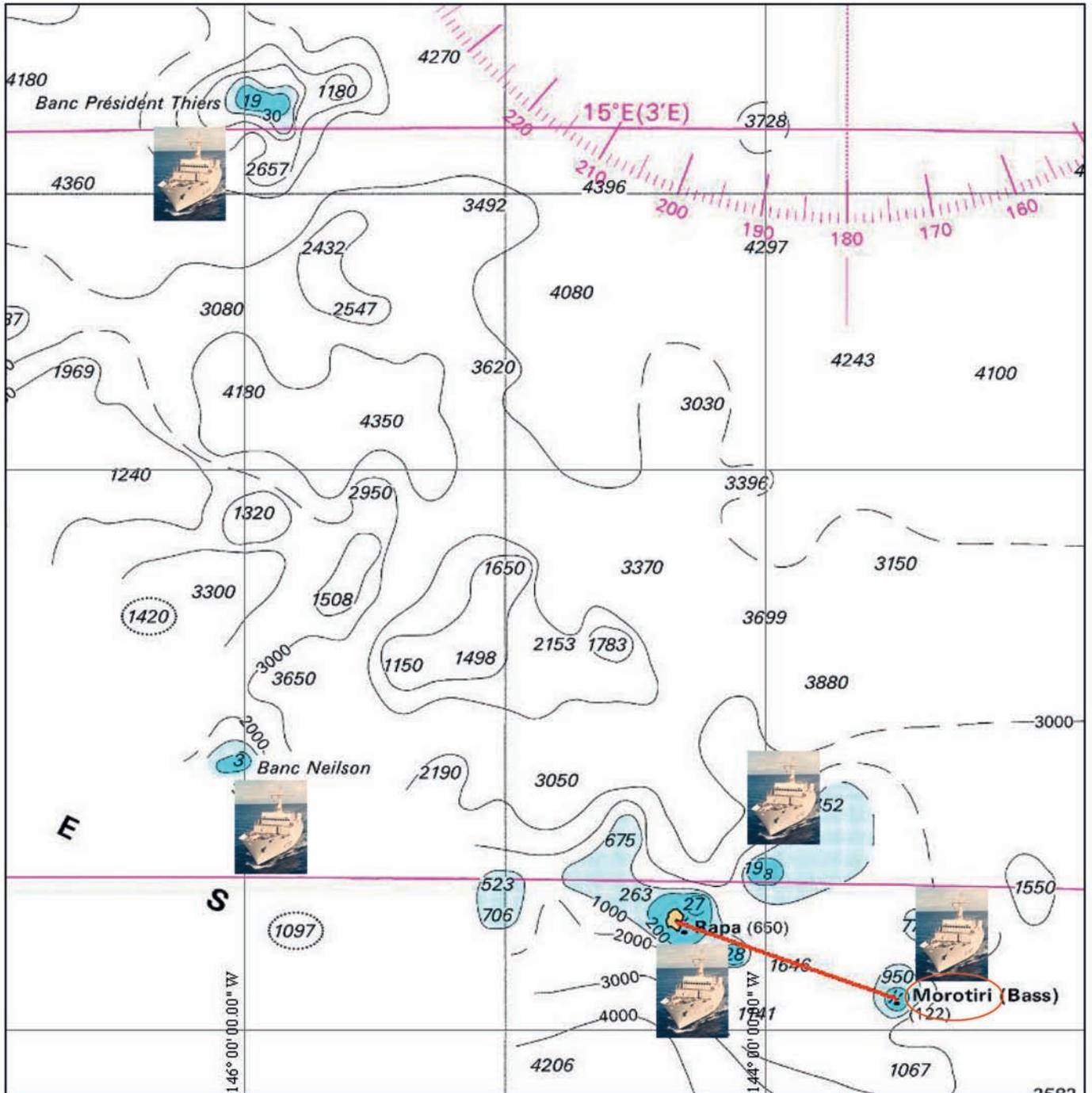
Îles Tuamotu (est)



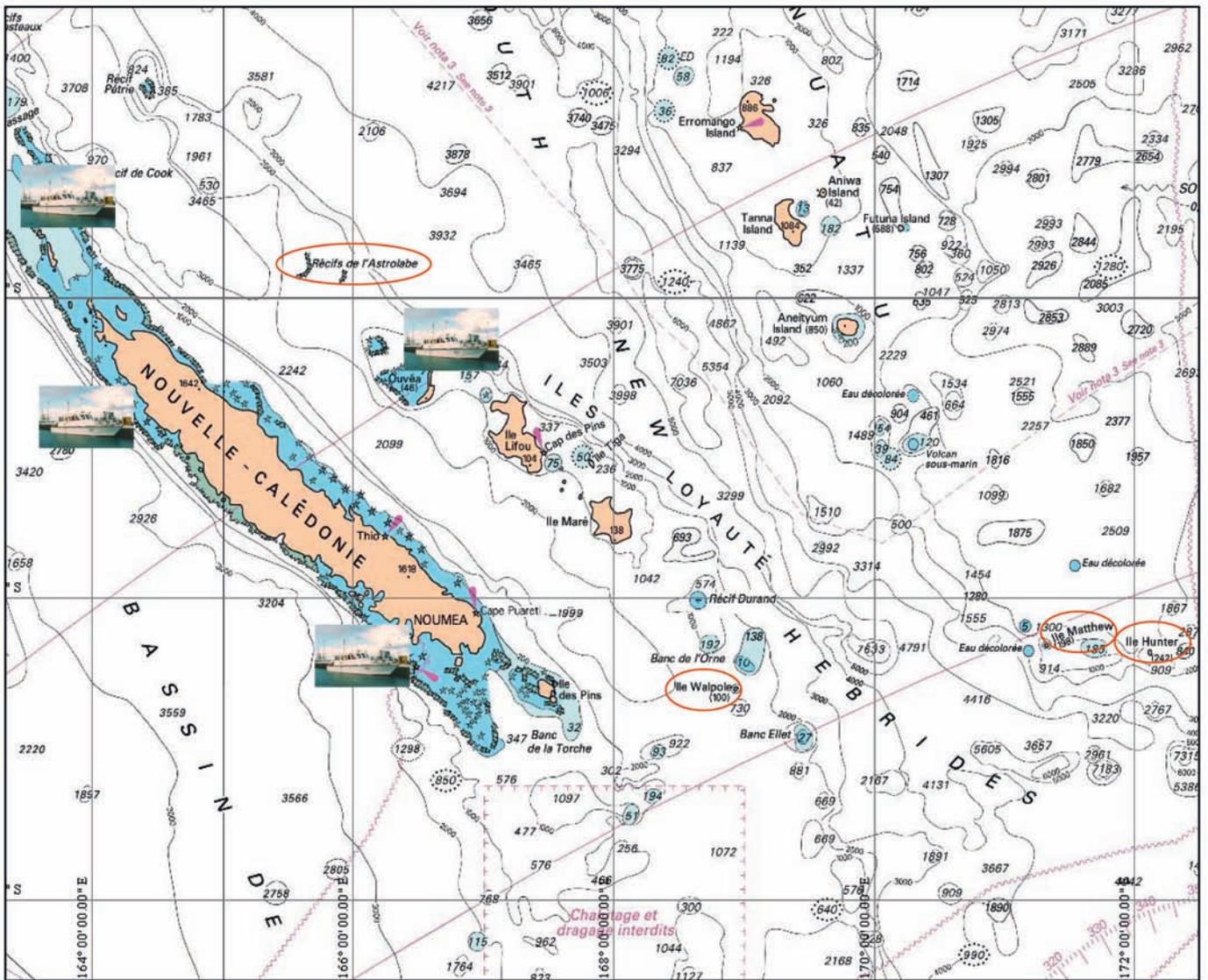
Îles de la Société



Îles Australes (est)



Nouvelle-Calédonie



MISSION HYDROGRAPHIQUE DE L'ATLANTIQUE

(1^{er} août 2002 – 31 août 2005)

par Henri Dolou, ingénieur en chef des études et techniques de l'armement,
directeur de la MHA

SOMMAIRE

INTRODUCTION

1. CONTEXTE	11-3
1.1 Généralités	11-3
1.2 Présentation de la MHA	
1.2.1 Environnement hiérarchique et organisation	11-3
1.2.2 Ressources humaines	11-3
1.2.3 Ressources financières	11-3
2. TRAVAUX RÉALISÉS	11-4
2.1 Mer du Nord – Manche	11-4
2.1.1 Contrôles des zones évolutives du Pas de Calais	11-4
2.1.2 Chenal d'accès à Calais et zone d'attente de Calais et Dunkerque	11-4
2.1.3 Levé de contrôle du site du naufrage du Tricolor	11-5
2.1.4 Revue d'amers de l'embouchure de la Seine à Rouen	11-5
2.1.5 Abords du cap de la Hague	11-5
2.1.6 Levé bathymétrique systématique de Lannion au raz Blanchard	11-5
2.1.7 Campagne océanographique EPEL 2003	11-5
2.1.8 Planches des zones d'activité : mer du Nord et Manche	11-6
2.2 Iroise – Golfe de Gascogne	11-8
2.2.1 Levé du port militaire de Brest	11-8
2.2.2 Levé en mer d'Iroise	11-8
2.2.3 Stéréopréparation des îles de Glénan	11-8
2.2.4 Levé de l'accès au port d'Argol à Hoëdic	11-9
2.2.5 Campagne d'étude géophysique : pertuis d'Antioche – SPAT	11-9
2.2.6 Levé d'accès au port de La Rochelle	11-9
2.2.7 Levé aux abords de Bayonne	11-9
2.2.8 Campagne océanographique MODYCOT – TURBI	11-9
2.2.9 Campagne océanographique OPTIC – PCAF 2004-1	11-9
2.2.10 Campagnes océanographiques MOUTON – CONGAS	11-9
2.2.11 Planches des zones d'activité : Iroise – golfe de Gascogne	11-10
2.3 Portugal	11-15
2.3.1 Expérimentation MREA 04	11-15
2.3.2 Planches des zones d'activité : MREA 04	11-15
2.4 Afrique – Golfe de Guinée – Atlantique sud	11-16
2.4.1 Levés au Togo	11-16
2.4.2 Levés au Bénin	11-16
2.4.3 Levés au Cameroun	11-17
2.4.4 Levés au Gabon	11-17
2.4.5 Levés en république du Congo	11-17
2.4.6 Planches des zones d'activité : golfe de Guinée, Atlantique sud	11-17
2.5 Antilles – Guyane	11-22
2.5.1 Levés aux abords de Saint-Martin et Saint-Barthélemy	11-22
2.5.2 Levés aux abords de la Guadeloupe	11-22
2.5.3 Levés aux abords de la Guyane	11-22
2.5.4 Planches des zones d'activité : Antilles – Guyane	11-23

2.6	Mer Rouge – Golfe d’Aden – Djibouti	11-25
2.6.1	Levés des ports de Djibouti et de Dorâle	11-25
2.6.2	Levés des abords de Djibouti	11-25
2.6.3	Levés dans le golfe de Tadjoura : Obock, Ghoubbet el Kharab	11-25
2.6.4	Levés du détroit de Bab el Mandeb et ses abords	11-25
2.6.5	Levés aux abords des îles Hanish.....	11-25
2.6.6	Planches des zones d’activité : mer Rouge – golfe d’Aden – Djibouti	11-26
2.7	Kerguelen	11-29
2.8	Zones diverses	11-29
2.8.1	Atlantique ouest : campagne de mesure d’éclairement nocturne	11-29
2.8.2	Atlantique ouest : projet CORIOLIS.....	11-29
2.8.3	Manche – Golfe de Gascogne : marégraphie, courantométrie	11-29
3.	MOYENS FLOTTANTS, VÉHICULES	11-30
3.1	Moyens flottants	11-30
3.1.1	Bâtiments	11-30
3.1.2	Vedettes hydrographiques	11-31
3.1.3	Coralline.....	11-31
3.2	Véhicules	11-32
4.	ÉQUIPEMENTS SCIENTIFIQUES	11-32
4.1	Localisation, géodésie, topographie	11-32
4.2	Marégraphie, bathymétrie.....	11-32
4.3	Géophysique.....	11-32
4.3.1	Magnétisme	11-32
4.3.2	Sédimentologie	11-32
4.4	Océanographie	11-33
4.4.1	Courantométrie	11-33
4.4.2	Bathysondages	11-33
4.4.3	Divers.....	11-33
4.5	Systèmes d’acquisition et de traitement de données.....	11-33
4.6	Informatique, réseaux, télécommunications	11-33
5.	ORGANISATION DE L’ACTIVITÉ	11-33
5.1	Contexte général.....	11-33
5.1.1	La MHA et la direction du SHOM	11-33
5.1.2	La MHA, les BH2 et ALFAN.....	11-34
5.2	Responsabilités à bord	11-34
5.3	Planification.....	11-35
6.	CONCLUSIONS	11-35
	ANNEXE : Liste des rapports des levés et campagnes	11-37
	ENCARTS PHOTOGRAPHIQUES	
	ENCART N° 1 : La vie à bord d’un BH2.....	11-40
	ENCART N° 2 : La passerelle et les machines d’un BH2	11-42
	ENCART N° 3 : Les vedettes hydrographiques	11-44
	ENCART N° 4 : Les travaux hydrographiques	11-47

INTRODUCTION

Ce rapport rend compte de l'activité de la mission hydrographique de l'Atlantique (MHA) du 1^{er} août 2002 au 31 août 2005, période pendant laquelle j'ai exercé les fonctions de directeur technique et de mission. Cette activité fut très diversifiée aussi bien au profit de l'hydro-océanographie militaire que de l'hydrographie générale. Elle se déroula essentiellement en Manche et Atlantique nord-est avec quelques déploiements dans le golfe de Guinée et le sud de la mer Rouge.

Il présente les travaux de la MHA conduits à la mer ou sur le terrain et pour lesquels les traitements ont été achevés pendant la période considérée. On y trouve ainsi les traitements des travaux antérieurs non achevés au départ des directeurs techniques précédents. Les derniers travaux à la mer réalisés en fin de période et non rédigés ne sont pas décrits (publication ultérieure dans futures annales hydrographiques).

La MHA a essentiellement employé les bâtiments hydrographiques de 2^e classe (BH2) *Borda*, *Laplace* et *La Pérouse*.

La production de la MHA a été essentiellement dirigée vers l'établissement principal du service hydrographique et océanographique de la marine (EPSHOM) pour y intégrer des bases de données avant exploitation pour réalisation de produits et services du SHOM.

L'amélioration de la connaissance de la bathymétrie des fonds fut permanente avec la rédaction régulière de projets d'avis urgent aux navigateurs (AVURNAV). Des zones dangereuses à la navigation ou au mouillage furent en particulier repérées en Afrique (ex : Port-Gentil au Gabon).

Les faits marquants furent :

- pour l'activité, les premiers retours de bâtiments hydrographiques français en Afrique occidentale depuis les années 1950 ;
- pour les moyens à la mer, l'acquisition de quatre nouvelles vedettes hydrographiques neuves équipées de systèmes d'acquisition les plus performants ;
- pour les méthodes, un effort très significatif pour consolider et décrire les procédures de travail, effort qui fut récompensé en 2004 par l'obtention, pour l'ensemble du SHOM, de la certification ISO 9001.

1. CONTEXTE

1.1 Généralités

J'ai pris la direction et la direction technique de la MHA le 1^{er} août 2002 en remplacement de l'ICETA Yves Guillam. L'ICETA Jean-Luc Déniel m'a succédé le 1^{er} septembre 2005.

1.2 Présentation de la MHA

La MHA était placée sous l'autorité organique directe de la direction du SHOM (DIRSHOM).

Elle comprenait deux unités : l'UHA (unité hydrographique de l'Atlantique) et la BHA (base hydrographique de l'Atlantique).

1.2.1 Environnement hiérarchique et organisation

UHA

L'UHA, principale unité de la MHA, regroupait à Brest, dans de nouveaux locaux situés dans la base navale, d'une part les hydrographes responsables de la conduite des levés et campagnes et du traitement des données, d'autre part le service « logistique » responsable des équipements spécifiques, de l'informatique et enfin de la préparation logistique des levés et campagnes.

BHA

La BHA avait pour rôle le soutien de l'UHA et, dans une moindre mesure, celui de la MOA (mission océanographique de l'Atlantique) qui était co-localisée à terre.

1.2.2 Ressources humaines

UHA

Ses effectifs (plan d'armement) comprenaient:

- 5 ingénieurs :
 - 1 directeur, ingénieur hydrographe (ICETA Dolou) ;
 - 1 ingénieur hydrographe par BH2 (*Borda* : IETA-IA Créach puis IPETA Rosada, *Laplace* : IETA Morin puis IPETA Parvillers ; *La Pérouse* : IETA Morvan puis IETA Baconnais-Rosez,) ;
 - 1 ingénieur électronicien chargé du service logistique (IETA Scourzic puis IETA Beuchard).
- 19 officiers marins hydrographes (OMH) : dont un chef de la salle de dessin (MP Desmares puis Major Dervin) et un chef d'équipe par BH2 (*Borda* : MP Lurton, PM Le Gall ; *Laplace* : PM Guégan, PM Sorgues, MT Noël ; *La Pérouse* : PM Sorgues, PM Lever.
- 16 officiers marins, quartiers-maîtres et matelots d'autres spécialités (mécaniciens, manoeuvriers, radio, détecteurs anti-sous-marins, informaticiens).

Total UHA : 40

L'effectif réel fut globalement conforme au plan d'armement, en certaines périodes pouvant durer plusieurs mois, le nombre d'OMH fut néanmoins en déficit en nombre d'une part (jusqu'à moins 4) et en personnel de qualification suffisante pour assurer les fonctions de chef d'équipe d'autre part. De jeunes hydrographes surent néanmoins remplir les responsabilités attendues.

BHA

Ses effectifs comprenaient :

- un officier marinier supérieur : MP Le Pennec puis MP Desmares ;
- deux autres officiers marins : un détecteur anti-sous-marins (puis fourrier), un secrétaire ;
- un volontaire.

Total BHA : 4

Total MHA : 44

1.2.3 Ressources financières

La MHA n'avait que très peu de moyens financiers. Aucun flux financier n'était mis en place ni pour les ressources matérielles (BH2, équipements hydro-océanographiques,

locaux à terre, véhicules...) ni humaines (solde). Elle disposait cependant de petites lignes de crédits pour faire face aux imprévus (fonds de prévoyance du SHOM : 7 000 Euros par an), aux achats de petits matériels (crédits en valeur de la marine : environ 20 000 Euros par an) et enfin aux déplacements de ses personnels (ligne de crédits du SHOM : environ 30 000 Euros par an).

2. TRAVAUX RÉALISÉS

2.1 Mer du Nord – Manche

2.1.1 Contrôles des zones évolutives du Pas de Calais

Des bancs de sable, d'une dizaine de kilomètres de large sur plusieurs kilomètres de long, sont observés dans le sud de la mer du Nord et dans le Pas de Calais. Sur ces bancs se sont développées des structures sédimentaires évolutives, des dunes de sables d'extension horizontale variable (toujours supérieure à la dizaine de mètres) et dont l'amplitude verticale est majoritairement métrique.

Le régime hydrodynamique macrotidal couplé à l'action des houles déplace ces dunes de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres par an, constituant un danger potentiel pour la navigation.

Il a ainsi été décidé de contrôler régulièrement ces zones évolutives selon des périodicités annuelles et décennales.

Les moyens utilisés (BH2) étaient les suivants : sondeur multifaisceau, sondeur vertical, sonar latéral, système de classification des fonds RoxAnn, système de prélèvement de fond, magnétomètre.

Les données météorologiques étaient réunies pour tout le mois précédent le levé.

Contrôles annuels

Ces contrôles concernaient six dunes dont le levé s'apparentait à une recherche d'obstruction. La méthodologie était la suivante :

- détermination approximative des lignes de crêtes des dunes par quelques profils orientés perpendiculairement à ces lignes ;
- restitution de la forme des dunes par des profils orientés suivant la direction des lignes de crêtes (sondage surfacique).

Ces levés de contrôle annuels étaient destinés au suivi de l'évolution des profondeurs et au recueil des données nécessaires à la poursuite d'une étude sédimentaire de la zone en Manche et en mer du Nord, étude devant aboutir à ajuster la stratégie de conduite de levés dans la zone.

Les zones concernées et les rapports correspondants sont les suivants :

- « dunes F » : levé du *Borda* d'octobre 2003 (RP n° 241 MHA/NP du 29 octobre 2003) ;
- « dunes F, Gne et D » : levé du *La Pérouse* de septembre 2004 (RP n° 311 MHA/NP du 1er décembre 2004).

Contrôles décennaux

Les zones concernées et les rapports correspondants sont les suivants :

- « zone E » : levé (Guillam) du *Borda* de mars 2001 (RP n° 174 MHA/NP du 3 juillet 2002) ;
- « zone PdC1 » levé (Guillam) du *Laplace* de mars et juin 2002 (RP n° 283 MHA/NP du 8 décembre 2003) ;
- « zone PdC3 » levé du *Borda* d'octobre et novembre 2003 (RP n° 20 MHA/NP du 13 janvier 2004) ;
- « zone PdC4 » levé du *La Pérouse* de septembre et novembre 2004 (RP n° 133 MHA/NP du 11 avril 2005).

2.1.2 Chenal d'accès à Calais et zone d'attente de Calais et Dunkerque

Chenal d'accès au port de Calais

Ce levé avait été planifié suite aux informations transmises par la capitainerie du port de Calais faisant état d'un éventuel déplacement du banc de sable situé dans la partie nord du chenal en vue du repositionnement de la bouée CA6 délimitant la limite nord-ouest du chenal. Les travaux réalisés par le *Laplace* en juin 2002 ont consisté à déterminer la position de l'isobathe des 10 m du chenal (RP n° 185 MHA/NP du 9 septembre 2002).

Zone d'attente des ports de Dunkerque et Calais

La connaissance hydrographique de la zone d'attente des ports de Dunkerque et de Calais était issue de levés antérieurs à 1985. Depuis lors, des obstructions avaient été portées sur les cartes marines d'après les indications venant des autorités portuaires. Ces obstructions étaient pour la plupart décrites comme des lignes de mouillage abandonnées et avaient été signalées sur les cartes sans cotation. Cette lacune d'information était source de problèmes, des navires refusant de mouiller dans la zone d'attente.

Une sonde plus courte que celle de la carte marine avait par ailleurs été détectée par un usager sur le ridens de Calais, laissant supposer qu'il avait évolué depuis le dernier levé effectué.

Le levé (bathymétrie de la zone d'attente et de ses abords, du ridens de Calais, recherche d'obstructions) a été conduit en trois phases :

1. en septembre et novembre 2003 avec le BH2 *Borda* (RP n° 83 MHA/NP du 6 avril 2004) ;
2. en septembre 2004 avec le BH2 *Borda* (RP n° 23 MHA/NP du 12 janvier 2005),
3. en novembre 2004 avec le BH2 *La Pérouse* dans une zone adjacente au levé du *Borda* pour hydrographier une dune qui avait migré vers l'ouest. (également RP n° 23 MHA/NP du 12 janvier 2005).

L'un des objectifs du levé était de détecter et coter les ancrs et lignes de mouillage perdues et signalées par les autorités portuaires. Cet objectif n'a pas pu être atteint de manière exhaustive, pour les raisons suivantes :

- les capacités du sonar latéral étaient insuffisantes pour détecter des objets de très faible dimension telles que les ancrs et les lignes de mouillage, difficiles à différencier des nombreuses traces sur le fond laissées par les navires au mouillage ou les chaluts ;

- la déviation magnétique provoquée par une ancre était, par fonds d'environ 28 m, en deçà de la capacité de détection du magnétomètre remorqué en surface ;
- la précision de la position de ces obstructions était enfin souvent insuffisante pour rendre possible les recherches par plongeurs dans un environnement peu propice par ailleurs aux plongées (forts courants, faible visibilité et profondeurs importantes qui limitaient chaque plongée à une dizaine de minutes).

2.1.3 Levé de contrôle du site du naufrage du *Tricolor*

Le samedi 14 décembre 2002, le « car-carrier » *Tricolor* était abordé par le porte-conteneurs *Kariba* et coulait en quelques minutes dans le Pas de Calais à 20 milles au nord-ouest de Dunkerque par 30 m de fond.

L'objectif du levé était de vérifier, qu'à l'issue de l'opération de découpage et de récupération du navire, il ne restait plus aucune obstruction sur les fonds. Les travaux ont été réalisés en janvier 2005 avec le BH2 *La Pérouse* (RP n° 71 MHA/NP du 21 février 2005).

2.1.4 Revue d'amers de l'embouchure de la Seine à Rouen

La revue d'amers (cartes marines 6683, 7419, 7420) et du balisage (instructions nautiques de plaisance) s'est déroulée en deux phases :

- les 11 et 12 janvier 2005 avec le BH2 *La Pérouse* (sélection, classement) ;
- du 9 au 13 mai 2005 par un détachement de la MHA, avec l'aide des ports autonomes du Havre et de Rouen (localisation au GPS, photos...).

Bilan (RP n° 190 MHA/NP du 18 mai 2005) :

- 88 amers ont été positionnés ;
- 70 amers ont été supprimés ;
- 425 fiches d'amers ont été rédigées, dont 18 pour de nouveaux amers.

2.1.5 Abords du cap de la Hague

Les travaux prescrits entraient dans le cadre de la définition d'une voie recommandée explorée au sonar latéral dans le passage de la Déroute afin d'inciter à terme les navires en transit à n'emprunter que cette voie.

Dans la continuité des travaux déjà réalisés dans le passage de la Déroute, la voie recommandée devait être prolongée vers le nord jusqu'au raz Blanchard. La bathymétrie des abords du cap de la Hague devait enfin être réactualisée.

Les travaux ont été réalisés avec le BH2 *La Pérouse* en septembre et octobre 1999, puis en mai et juin 2000 pour enfin être achevés en juin 2003 (RP n° 143 MHA/NP du 15 juillet 2003).

2.1.6 Levé bathymétrique systématique de Lannion au raz Blanchard

Cette zone est en partie empruntée par les navires qui transitent entre les rails d'Ouessant et des Casquets pour rejoindre, entre autres, les ports en eaux profondes

d'Europoort (tirant d'eau maximum 22,6 m dans le Pas de Calais) et du Havre - Antifer (tirant d'eau maximum 28,5 m). La connaissance bathymétrique initiale de la zone était en grande partie issue de levés au plomb de sonde.

Le levé a été divisé en zones : nord, centre, sud-ouest et sud-est ; elles-mêmes découpées en boîtes.

Zone nord : boîtes 1 à 6

Les travaux, conduits à partir du *Laplace*, ont consisté :
 - à procéder aux recherches (juin 2002) d'épaves détectées lors du levé régulier de 2000 dans les boîtes 1, 2, 3, 4 et 5 de la zone nord (RPS n° 132 MHA/NP du 8 juillet 2003) ;
 - et, pour achever ces six boîtes, à réaliser (septembre 2003) quelques profils complémentaires (RPS n° 278 MHA/NP du 8 décembre 2003).

Zone nord : boîtes 10 à 18

Les travaux ont été conduits à partir du *Laplace* en septembre 2000, puis en mai et juin 2002 et enfin en septembre 2003 (RP n° 23 MHA/NP du 15 janvier 2004).

Zone nord : boîtes 7 à 9.1

Les travaux ont été conduits à partir du *Borda* et du *Laplace* en septembre 2000, puis septembre 2001 et enfin en septembre 2003. Les boîtes 9 et 9.1 couvrent le banc des Langoustiers. Le RP n° 46 MHA/NP du 17 février 2004 conclut le levé de la zone nord.

Zone centre : boîte 9

Les travaux ont été réalisés en mai, juin et octobre 2004 avec le BH2 *Borda*. La zone concernée est située à l'ouest du plateau des Roches Douvres et du plateau de Barnouic ; elle était, avant levé, en partie incomplètement hydrographiée. (RP n° 295 MHA/NP du 24 novembre 2004).

Zone centre : boîtes 1 à 4

Les travaux réalisés concernent 5 recherches par plongeurs réalisées en septembre 2003 puis en novembre et décembre 2004 à partir du *Laplace*. Ces travaux ont permis d'achever le levé des boîtes 1 à 4 de la zone centre, levé qui avait été entrepris en 2001 (RP n° 40 MHA/NP du 24 janvier 2005).

Zone centre : boîte 5

Les travaux réalisés concernent la partie couvrant les accès nord de l'île de Bréhat et de la rivière du Trieux. Cette boîte inclut en particulier le début de deux routes sur alignement permettant la navigation de part et d'autre de l'île de Bréhat, à savoir la route de la rivière du Trieux à l'ouest, et celle du chenal de Bréhat à l'est (RP n° 110 MHA/NP du 29 mars 2005).

Zone sud-est : boîte 9

La zone considérée est située au nord du Cap Fréhel ; l'hydrographie initiale datait de 1924 à 1926. Les travaux ont été réalisés en juin et octobre 2004 à partir du *Borda* (RP n° 296 MHA/NP du 24 novembre 2004).

2.1.7 Campagne océanographique EPEL 2003

Le rapport de campagne n° 54 MHA/NP du 19 mars 2003 rend compte des travaux à la mer réalisés lors de la campagne EPEL en février et mars 2003 à bord du BH2 *Laplace*.

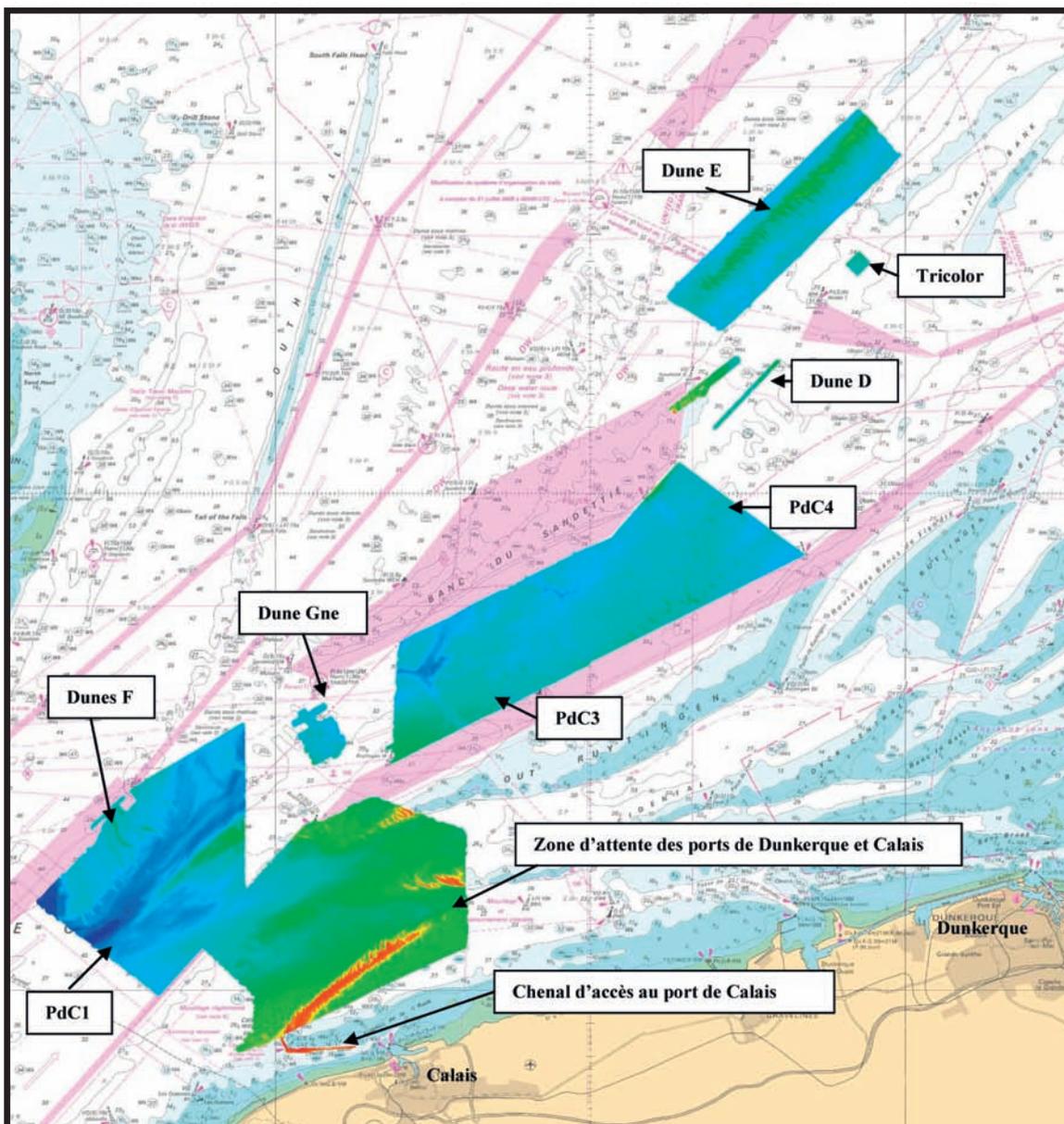
La campagne EPEL 2003 s'inscrivait dans le cadre d'un projet de développement de modèles hydrodynamiques côtiers régionaux capables de représenter les circulations, les niveaux d'eau et les états de mer. Elle fut menée en coopération avec le centre d'études techniques maritimes et fluviales, Météo France, Ifremer, l'université de Caen et le Muséum d'Histoire naturelle de Dinard. Les objectifs de cette campagne étaient plus précisément :

- la validation des processus de génération des vagues et d'interaction avec la topographie et les courants ;
- l'étalonnage et essais du système WaMoS II de traitement d'images radar de navigation en bande X, pour la mesure des vagues et du courant de surface ;
- la vérification des modèles de circulation océanique (MARS et TELEMAC) ;
- la validation de la mesure de courant de surface par radar VHF.

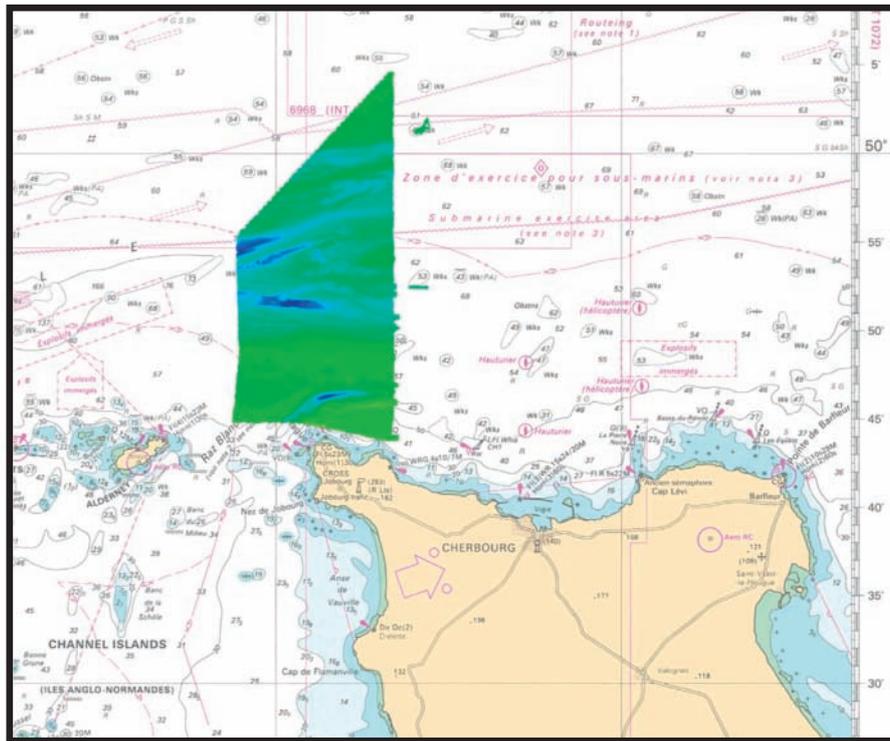
Les travaux à la mer ont consisté :

- au mouillage de quatre bouées houlographes Datawell, de trois courantomètres houlographes petits fonds, d'un courantomètre profileur, de trois courantomètres ponctuels, d'un marégraphe petits fonds et de bouées PTR (suivi automatique des localisations par l'EPSHOM) ;
- à un levé bathymétrique au sondeur multifaisceau (SMF) (RP n° 230 MHA/NP du 22 octobre 2003) dédié au programme océanographique complété de mesures au sonar latéral, de mesures RoxAnn et enfin de prélèvements ;
- à des mesures de houle par le radar de navigation : système WaMoS II.

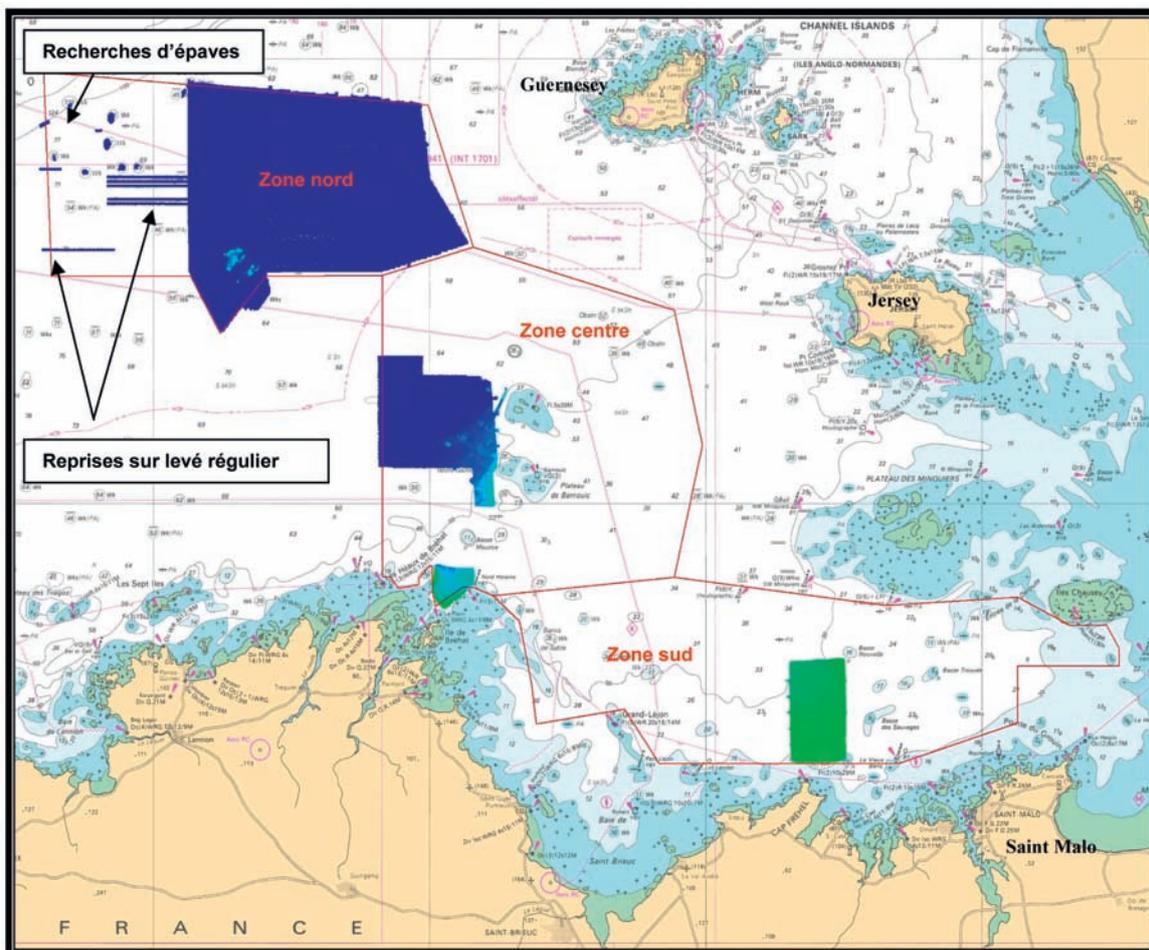
2.1.8 Planches des zones d'activité : mer du Nord et Manche



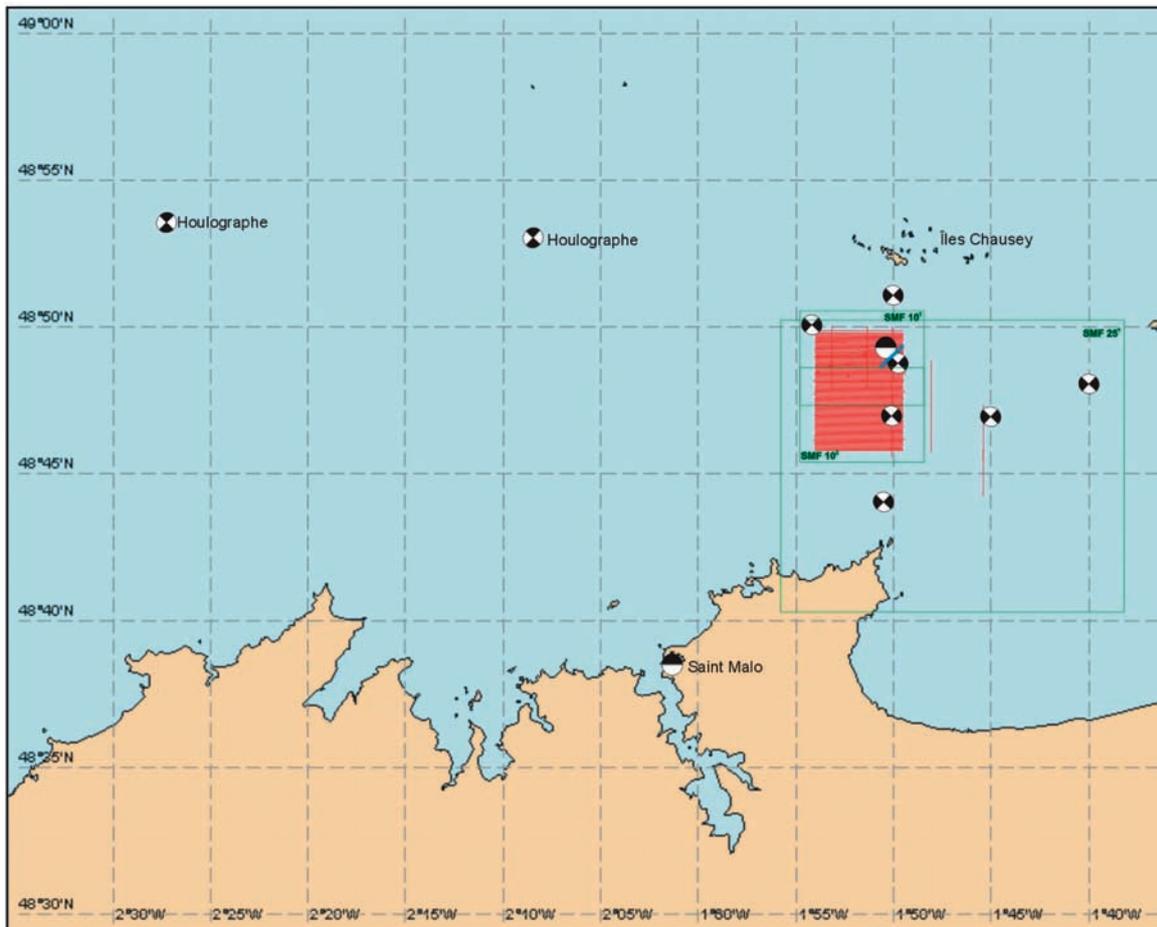
Contrôle des zones évolutives du Pas de Calais
Chenal d'accès à Calais et zone d'attente de Calais à Dunkerque
Levé de contrôle du site du naufrage du *Tricolor*



Abords du cap de la Hague



Levé bathymétrique systématique de Lannion au raz Blanchard



Campagne océanographique EPEL 2003

2.2 Iroise – Golfe de Gascogne

2.2.1 Levé du port militaire de Brest

Le bureau exploitation du groupement support maritime de la base navale de Brest souhaitait disposer d'un levé bathymétrique récent de la Penfeld (les levés antérieurs remontant à 1972 et 1982) afin de vérifier la sécurité de la navigation des bâtiments entrant et sortant des bassins 4 et 6. Les travaux ont été conduits avec la VH9 *La Foi*. Un engraissement moyen d'environ 50 à 70 cm a été mis en évidence suivant l'axe du chenal de la Penfeld (RP n° 225 MHA/NP du 24 septembre 2002).

2.2.2 Levé en mer d'Iroise

Les travaux prescrits avaient pour objectif d'améliorer la connaissance de l'environnement bathymétrique et sédimentologique en mer d'Iroise. Le levé a été découpé en boîtes.

Boîte 1

Le RP n° 205 MHA/-- du 2 septembre 2002 rend compte des travaux de la boîte 1. La présence de très nombreuses filières de casiers au sud de la zone a conduit à réduire l'extension sud de la boîte dans la partie est. Les AVURNAV

émis n'ont été d'aucune utilité quant à la modification du comportement des pêcheurs dans la zone : un sonar latéral a ainsi été perdu. Les travaux ont été conduits par le *Borda* en juin et juillet 2001 puis par le *Laplace* en juillet 2002.

Boîtes 2 et 3

Les travaux correspondants ont été réalisés entre 2001 et 2005. L'acquisition des données du sondeur de sédiments et des données RoxAnn a été effectuée en 2001 par le BH2 *Borda* et la bathymétrie réalisée au mois de septembre 2003 par le BH2 *La Pérouse*. Les prélèvements de sédiments ont été effectués par le BH2 *Borda* en 2001 puis par le BH2 *Laplace* en 2002 et 2005. Les résultats sont consignés dans le RP n° 150 MHA/-- du 18 avril 2005.

Compléments aux levés de 1998-1999

Ces travaux ont été réalisés par le BH2 *La Pérouse* en septembre 2003 puis en juin et juillet 2004. Ils complètent les travaux effectués par le BH2 *Borda* entre mars 1998 et février 1999. Les résultats sont consignés dans le RP n° 163 MHA/-- du 2 septembre 2004.

2.2.3 Stéréopréparation des îles de Glénan

Une stéréopréparation des îles de Glénan a été réalisée en octobre 2004 par le BH2 *Borda*.

Il s'agissait de déterminer la position de points d'appui sélectionnés par le bureau photogrammétrie de l'EPSHOM (RPS n° 276 MHA/NP du 15 novembre 2004).

2.2.4 Levé de l'accès au port d'Argol à Hoëdic

Il s'agissait de reprendre le sondage d'une zone précédemment insonifiée par le SMF EM1002S du BH2 *Borda* en juillet 2000 qui n'avait pu être exploitée car des décalages entre profils avaient été décelés sans correction possible.

Le sondage a été réalisé par la vedette *Goéland* du BH2 *Laplace* au SMF EM3000 en avril 2005 (RPS n° 186 MHA/NP du 13 mai 2005).

2.2.5 Campagne d'étude géophysique : pertuis d'Antioche – SPAT

Les travaux prescrits avaient pour objectif principal de compléter la connaissance des paramètres géoacoustiques et de dynamique sédimentaire dans le pertuis d'Antioche. Cette campagne géophysique complétait d'autres campagnes (SIFADO, MOBIDYC1 et NOMADES) qui avaient produit un levé sismique très haute résolution de la zone. Le levé hydrographique (classé de « reconnaissance ») et sédimentologique a été conduit en juillet 2001 à partir du BH2 *Borda* (RP n° 237 MHA/NP du 7 octobre 2002).

2.2.6 Levé d'accès au port de La Rochelle

Les travaux prescrits avaient pour objectif d'améliorer la connaissance de l'environnement bathymétrique et sédimentologique dans le chenal d'accès au port de La Rochelle. Le levé a été découpé en 4 boîtes. Les travaux ont été réalisés en septembre 2002 avec le BH2 *Borda*. Les levés des boîtes 1 et 4 et de la partie nord de la boîte 2 ont été achevés (RP n° 18 MHA/NP du 10 janvier 2005).

2.2.7 Levé aux abords de Bayonne

Ce levé (bathymétrie, marée, revue d'amers, stéréopréparation) a été réalisé par le BH2 *Borda* et ses vedettes entre avril et octobre 2004 en prévision de la réalisation prochaine de la carte internationale des abords et du port de Bayonne.

L'objectif des travaux prescrits était de :

- disposer d'une voie recommandée d'accès à l'embouchure de l'Adour pour les bâtiments entrant dans l'Adour ;
- disposer d'une zone de mouillage et d'attente à l'entrée des ports de l'Adour ;
- mettre à jour l'information nautique (revue d'amers), la connaissance des épaves et de la topographie des ports (spatiopréparation entre Hendaye et Vieux Boucau) ;
- améliorer la connaissance de la marée.

Le RP n° 1 MHA/NP du 3 janvier 2005 rend compte des principaux travaux réalisés.

La revue d'amers et du balisage de Biarritz à Boucau a fait l'objet du RPS N° 305 MHA/NP du 29 novembre 2004.

La stéréopréparation de la zone a fait l'objet du BE n° 149 MHA/BE/NP du 02 juillet 2004.

2.2.8 Campagne océanographique MODYCOT – TURBI

Ces campagnes visaient à améliorer la connaissance de l'environnement marin (modélisation hydrodynamique et sédimentaire) par petits fonds, dans la zone allant de la pointe de Penmarc'h à la frontière franco-espagnole, entre la côte et la bordure du plateau continental.

Ont été recueillies le long de réseaux couvrant la zone : des mesures hydrologiques (P, T, S, turbidité, irradiance, fluorimétrie), des données de mesures effectuées au disque de Secchi ainsi que des mesures acquises par un courantomètre embarqué.

Ont par ailleurs été mouillés : des courantomètres profileurs Doppler, des bouées lagrangiennes, une bouée houlographe, 2 sondes optiques, etc.

MODYCOT 2002

Cette première campagne s'est déroulée en octobre 2002 à bord du *La Pérouse* (rapport de campagne n° 258 MHA/NP du 25 octobre 2002 et RP n° 296 MHA/NP du 11 décembre 2002).

MODYCOT – TURBI 2003.1

Cette seconde campagne s'est déroulée en mars et avril 2003 également à bord du BH2 *La Pérouse* (rapport de campagne n° 79 MHA/NP du 23 avril 2003 et RP n° 99 MHA/NP du 11 juin 2003).

2.2.9 Campagne océanographique OPTIC – PCAF 2004-1

Cette campagne était une des quatre opérations OPTIC-PCAF consacrées à l'observation de la turbidité et de ses composantes aux quatre saisons de l'année, dans le golfe de Gascogne. Elle s'inscrivait dans le cadre du projet « Turbidité » du SHOM dédié à l'étude de ce paramètre et à son impact sur la visibilité sous-marine, dans la continuité des projets MODYCOT. Cette campagne fut menée en coopération avec l'Ifremer et l'université de Bordeaux. Les principaux travaux (à l'image de ceux des campagnes MODYCOT) ont été conduits en octobre 2004 par le BH2 *La Pérouse*. Ont également participé le navire océanographique (NO) *Gwen-Drez* de l'Ifremer et le bâtiment de soutien d'assistance et de dépollution (BSAD) *Argonaute* (récupération de mouillages).

Les résultats ont été consignés dans le RC n° 339 MHA/NP du 15 décembre 2004 et le RP n° 76 MHA/NP du 24 février 2005.

2.2.10 Campagnes océanographiques MOUTON – CONGAS

MOUTON 2004

Le programme d'études amont (PEA) MOUTON (modélisation océanique d'un théâtre d'opérations navales), conduit par le SHOM, visait à prouver la possibilité d'étendre la modélisation océanique opérationnelle du domaine hauturier au domaine côtier pour couvrir un théâtre d'opérations navales. La partie validation du PEA requérait des comparaisons directes entre mesures à la mer et modèle.

Ces mesures ont eu lieu en juin et juillet 2004 à partir du BH2 *La Pérouse*.

Le RC n° 145 MHA/NP du 16 juillet 2004 rend compte des travaux à la mer réalisés et des difficultés rencontrées tant au niveau du bord (treuil) que de la MHA (bathysonde).

Le RP n° 153 MHA/NP du 23 juillet 2004 rend compte des données traitées par la MHA (hydrologie, courantométrie).

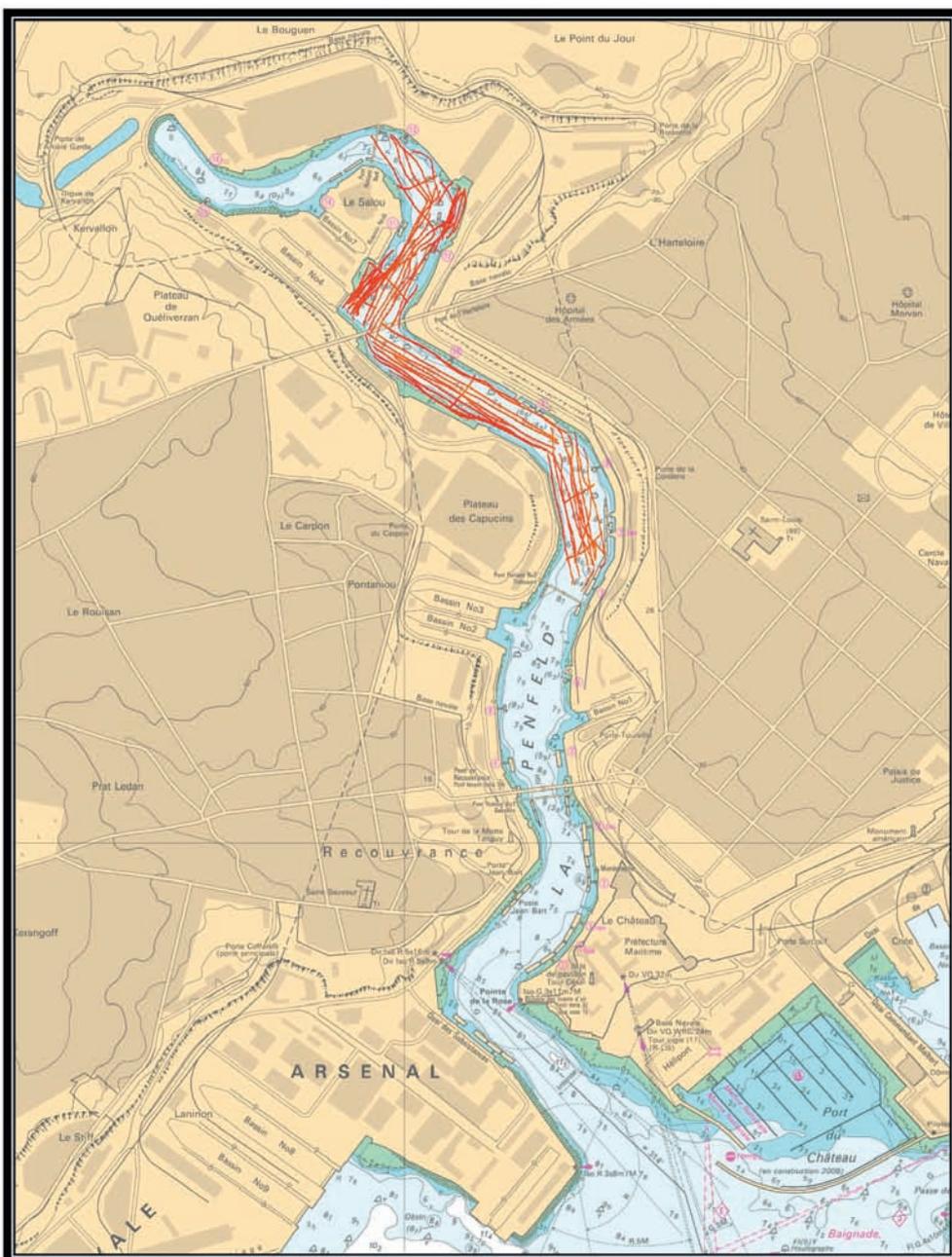
MOUTON – CONGAS 2005

Le rapport particulier n° 291 MHA/NP du 21 juillet 2005 rend compte des travaux réalisés à la mer à bord du BH2 *La Pérouse* lors de la campagne CONGAS de juin et juillet 2005. Cette campagne qui s'inscrivait dans le cadre du pro-

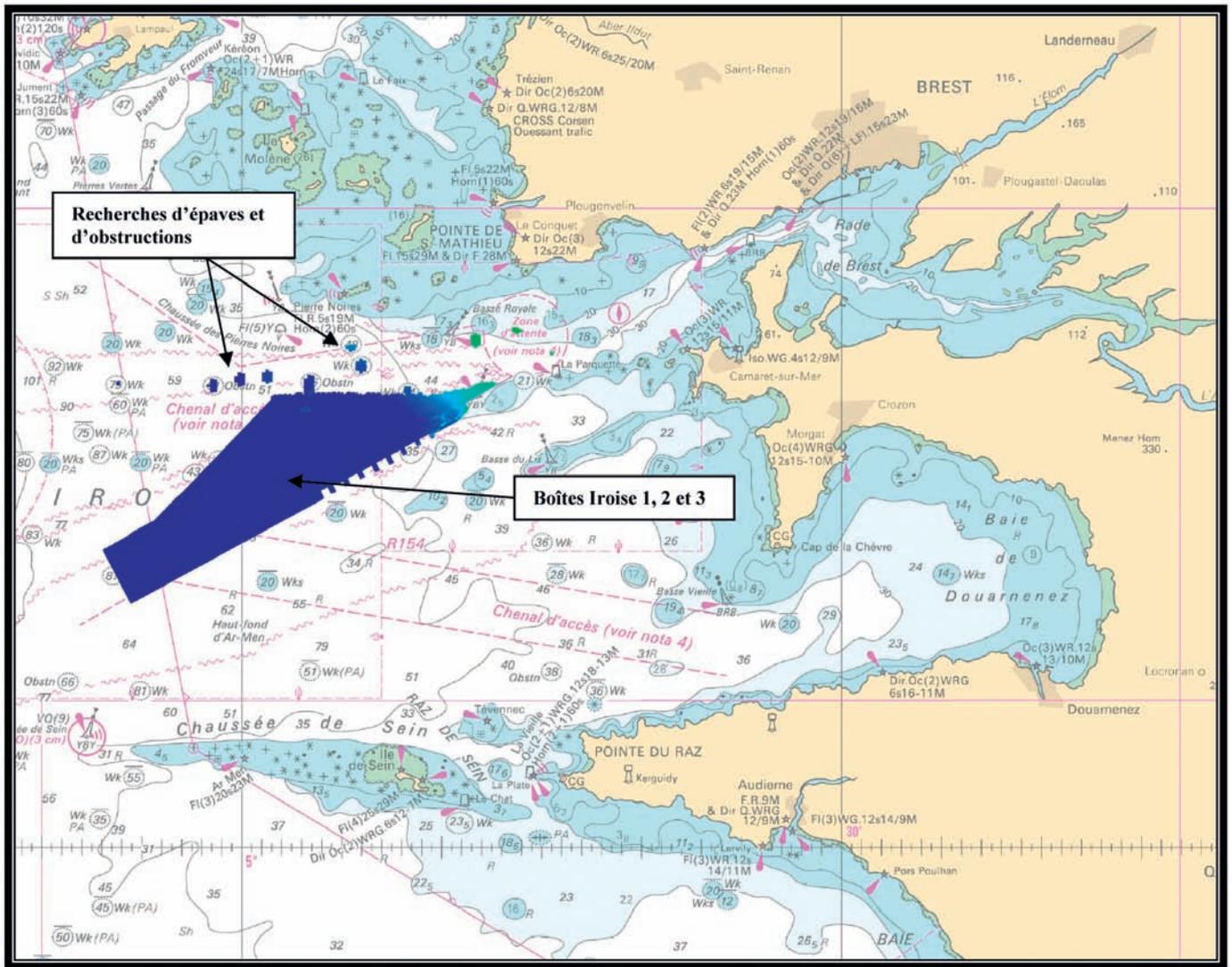
jet MOUTON avait pour objet l'étude de la circulation lagrangienne au-dessus de la pente continentale du golfe de Gascogne (CONGAS) et en son voisinage (plaine abyssale et plateau). Des radiales hydrologiques (bathysondes, Sippican), des mouillages de flotteurs (CMOD, Surdrift, APEX) ont été réalisés et ont permis la prospection de structures océaniques de type Meddies et Swoddies.

La campagne CONGAS 2005 fut menée en coopération avec le laboratoire de physique des océans (LPO : unité mixte de recherche de l'UBO/CNRS/Ifremer).

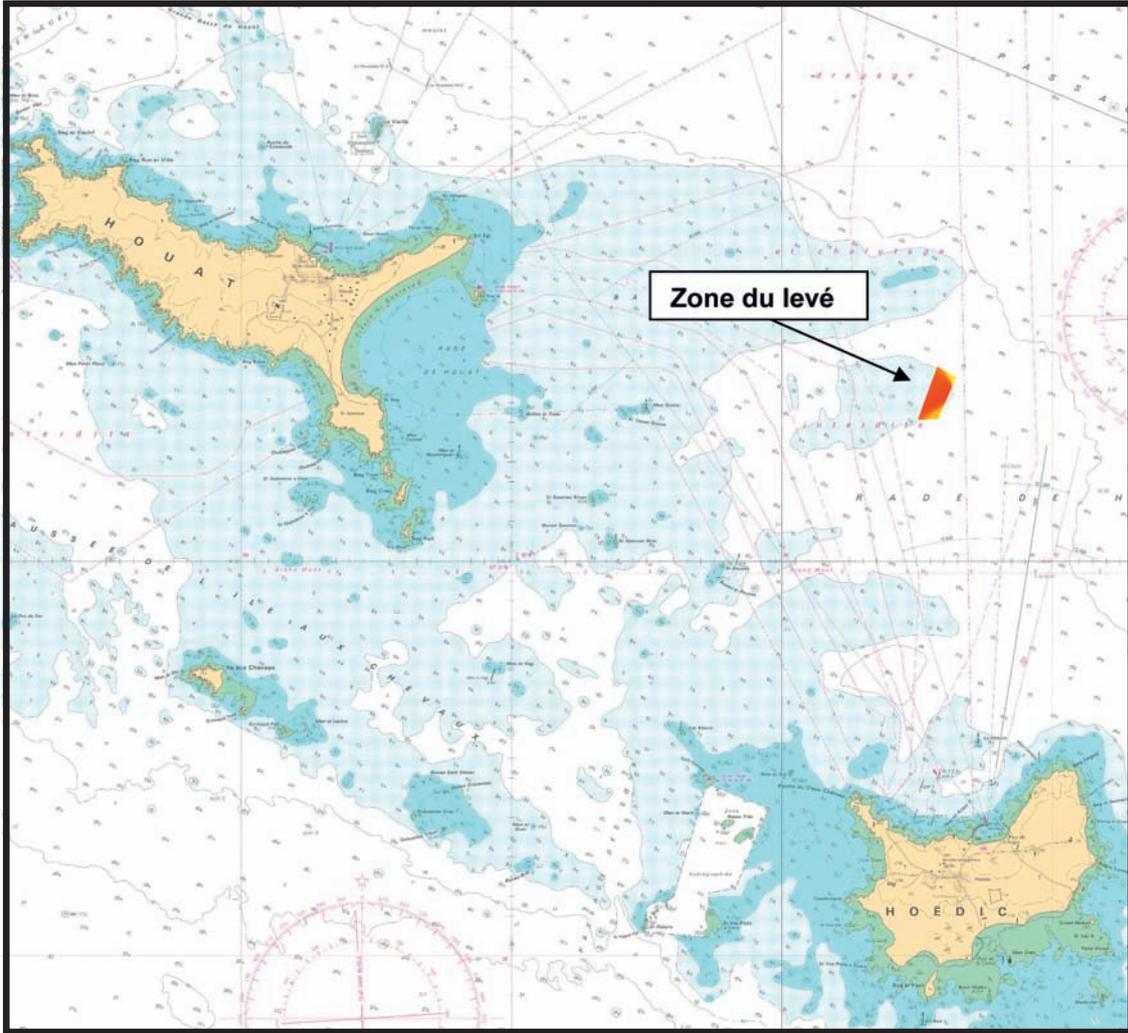
2.2.11 Planches des zones d'activité : Iroise – golfe de Gascogne



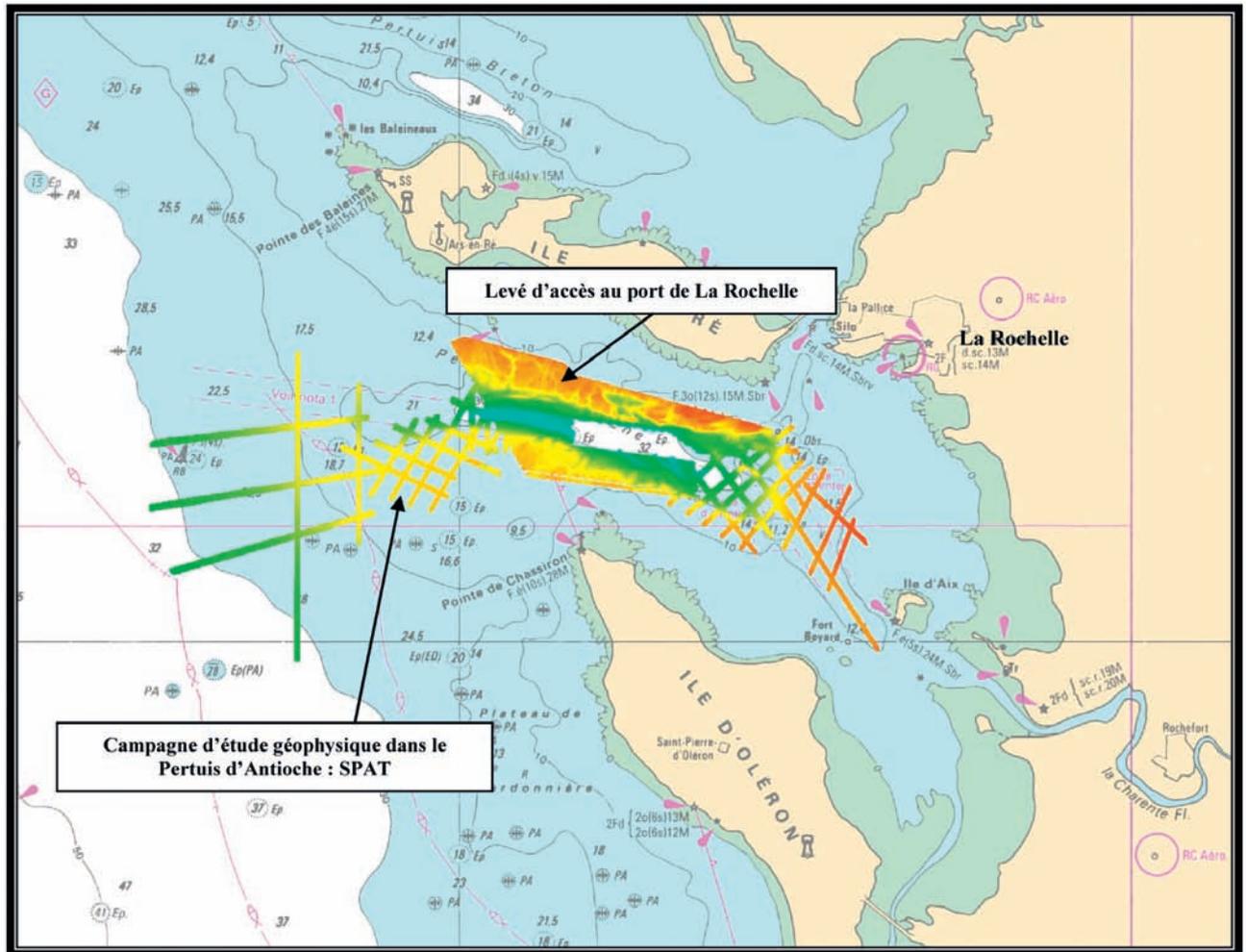
Levé du port militaire de Brest



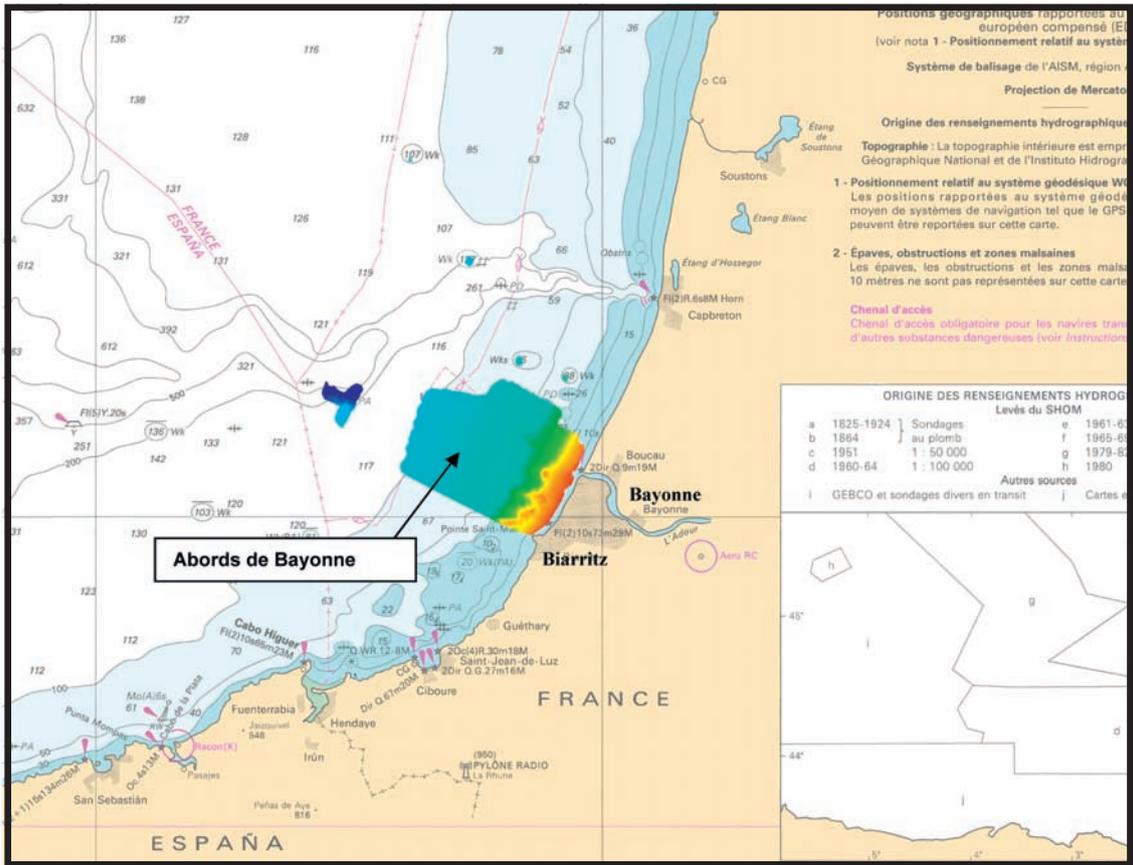
Levé en mer d'Iroise



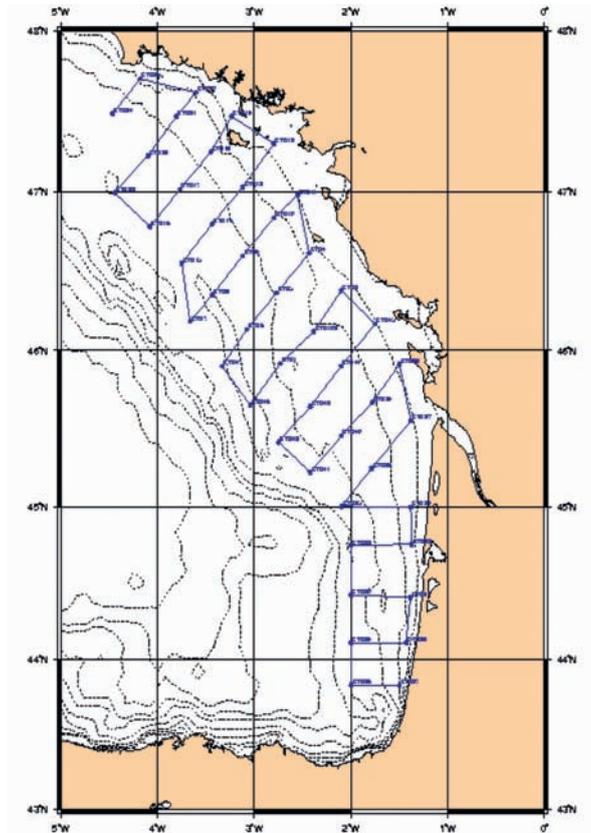
Levé de l'accès au port d'Argol à Hoëdic



Campagne d'étude géophysique pertuis d'Antioche – SPAT
 Levé d'accès au port de La Rochelle



Levé aux abords de Bayonne



Campagnes océanographiques PRODYCOT – TURBI – OPTIC – PCAF – 2004-1
MOUTON – CONGAS (Exemple d'un réseau de mesure)

2.3 Portugal

2.3.1 Expérimentation MREA 04

Le NATO undersea research center (NURC) a organisé du 28 mars au 19 avril 2004 une expérimentation REA baptisée MREA 04 (maritime rapid environment assessment).

Les moyens engagés à la mer étaient le NATO research vessel (NRV) *Alliance* affrété par l'OTAN, et le BH2 *Borda*. L'expérimentation s'est déroulée au large de Setúbal et Pinheiro da Cruz au Portugal, dans la même zone que l'exercice « Linked Seas », auquel avait participé le BH2 *La Pérouse* en avril 2000.

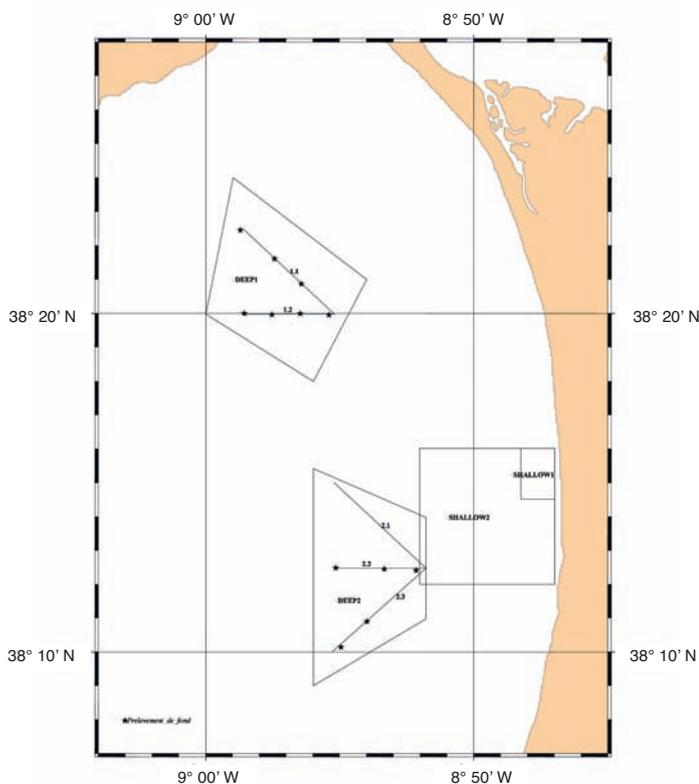
Au cours de l'expérimentation, le BH2 *Borda* (dont ses deux nouvelles vedettes *Phaéton* et *Macareux*) a réalisé des levés bathymétriques, un levé au sonar latéral et au sondeur de sédiments, des mesures hydrologiques et des prélèvements de fonds. Les mesures demandées étaient notamment destinées à alimenter ou valider divers modèles opérationnels mis en œuvre par les équipes scientifiques partenaires de l'expérimentation.

Après traitement et validation à bord, les données acquises par le *Borda* étaient transmises à l'*Alliance* avec les contraintes d'une opération REA, c'est-à-dire en temps très peu différé, par courrier électronique.

Deux sondes dangereuses pour la navigation sous-marine ont été détectées.

L'ensemble des résultats est consigné dans le RP n° 177 MHA/NP du 9 septembre 2004.

2.3.2 Planches des zones d'activité : MREA 04



Expérimentation MREA 04

2.4 Afrique – Golfe de Guinée – Atlantique sud

Les levés hydrographiques en Afrique de l'ouest les plus récents dataient en majorité des années 50 à l'époque de la mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique (voir AH 1950 : Brie ; AH 1952 : Manevy, AH 1953 : Le Fur, AH 1955 : Sauzay ; AH 1956 : Doniol ; AH 1958 : Manevy ; AH 1959/1960 : Péluchon, Bourgoquin).

L'évolution de l'environnement, du trafic maritime, mais aussi des moyens de navigation (GPS, carte électronique, ...) imposaient une remise à niveau suffisante de la connaissance. Le besoin était dual :

- pour la navigation civile (commerce, pêche, ...)
- pour les opérations militaires de projection.

Trois déploiements de BH2 au nom de ZMAto (zone maritime Atlantique Ouest) furent réalisés avec le *Laplace* en 2002 et 2004 et avec le *Borda* en 2003. Ces déploiements eurent une durée de trois mois, ils devaient aussi favoriser, dans le domaine de l'hydrographie, la coopération avec les autorités locales.

La réussite de ces missions dépendait de la capacité à intervenir très vite dans les eaux (autorisation de travail) et ports (installation de matériel de localisation et de marégraphie) des pays concernés. Cette capacité fut souvent acquise grâce au soutien local :

- des représentations françaises : ambassades, attachés militaires, DCMD (direction de la coopération militaire de défense, forces françaises (ex : 6^e BIMA basé à Port-Gentil)), etc. ;
 - des autorités portuaires ;
 - des forces marines locales (surtout officier accompagnateur sur le terrain)
- ... sans oublier la débrouillardise bien connue des hydrographes !

Il était aussi particulièrement important de savoir faire face à l'inattendu comme la mutinerie de l'automne 2002 en Côte d'Ivoire ou, autre exemple, porter assistance lors du naufrage du ferry *Joola* au large du Sénégal entre le 28 septembre et le 2 octobre 2002.

2.4.1 Levés au Togo

Il s'agissait de :

- réaliser le levé bathymétrique d'une zone d'approche, d'une voie recommandée et d'une zone de mouillage ;
- caler une image SPOT ;
- critiquer l'information nautique existante et de recueillir des informations nouvelles ;
- conduire des travaux de géodésie (calage des anciens systèmes) ;
- observer la marée et les courants ;
- recueillir des données de sédimentologie ;
- contrôler les levés existants récents (sociétés privées).

Les travaux conduits ont tenu compte des besoins exprimés par les responsables maritimes locaux dans la bande côtière et aux approches du wharf de Kpémé (chargement de phosphate et déchargement de pétrole).

Concernant les levés portuaires réalisés par des sociétés privées (souvent chargées de dragages) force est de constater que les travaux hydrographiques n'étaient pas toujours

conduits avec sérieux. Il a ainsi été constaté qu'un levé n'avait pas fait l'objet de réduction de marée (levé à marée basse !) et qu'un autre avait été référencé par rapport au zéro IGN et non pas au zéro hydrographique (écart de 0,5 m). Ces levés étaient par ailleurs conduits sans recherche sur remontées mesurées. Au bilan, des écarts de 0,5 m à 1 m étaient courants.

D'autres écarts importants ont été observés en particulier dans l'avant port de Lomé (entre 1 et 2 m), écart dus d'une part aux choix de réduction de sonde déjà signalés et d'autre part aux ensablements progressifs (structures dunaires au niveau de la passe d'entrée dans le port).

Travaux de 2002

Ils ont été conduits par le BH2 *Laplace* durant la mission ZMAto en novembre 2002 (RP n° 104 MHA/NP du 6 juin 2003).

Travaux de 2004

Ils ont été conduits à nouveau par le BH2 *Laplace* durant la mission ZMAto en avril et mai 2004 (RP n° 207 MHA/NP du 21 septembre 2004). Le *Laplace* bénéficiait alors de nouvelles vedettes dont une équipée d'un SMF. Il était néanmoins contraint de naviguer sur une seule ligne d'arbre compte tenu du potentiel disponible avant la prochaine révision des moteurs. Cela ne fut cependant pas préjudiciable pour les levés SMF avec engins remorqués.

2.4.2 Levés au Bénin

Les travaux à conduire n'étaient globalement pas différents de ceux du Togo, il s'agissait avant tout d'assurer la sécurité de la navigation aux abords de Cotonou. Les travaux ont été effectués par les vedettes du BH2 *Laplace* en mai et juillet 2004 au cours de la mission ZMAto 04 (RP n° 329 MHA/NP du 8 décembre 2004).

Un objectif primordial était aussi le contrôle bathymétrique de la passe du port de Cotonou suite à l'incident nautique survenu à un bâtiment de la marine nationale en janvier 2004 lors de son franchissement de la passe. L'ensablement permanent de la passe était en effet un phénomène marquant du port de Cotonou dont il fallait prendre la mesure. Des modifications flagrantes des fonds dans l'axe de la passe et aux abords sud du port ont ainsi été relevés. Un engraissement moyen de 1,5 m, pouvant aller à plusieurs mètres à proximité des digues ouest et du môle, a été constaté.

Le levé de contrôle réalisé dans le port, a également fait apparaître localement des zones d'engraissement. Les écarts relevés pouvant atteindre 2,5 mètres. Ce phénomène d'ensablement a été largement communiqué aussi bien auprès du SHOM (avertissements sur la documentation nautique) qu'auprès de la direction du port.

Le recueil de l'information, la sensibilisation aux exigences de la convention SOLAS (safety of life at sea) en matière de communication de l'information nautique et la préparation d'une future mission plus longue faisaient aussi partie des priorités de ce passage à Cotonou.

2.4.3 Levés au Cameroun

Les travaux ont été effectués par le BH2 *Laplace* et ses vedettes en mai, juin et juillet 2004 au cours de la mission ZMAto 04 (RP n° 249 MHA/NP du 18 juin 2006). Ils concernent la sécurité de la navigation à savoir :

- le levé d'une partie de la zone de mouillage de Souellaba, celui du chenal du fleuve Cameroun et enfin le contrôle du chenal dragué de la rivière Wouri ;
- des travaux de marégraphie (dont rattachement à l'ellipsoïde de deux observatoires de marée entretenus par le port de Douala), et de courantométrie ;
- une revue d'amers et de balisage et le recueil d'informations nautiques.

2.4.4 Levés au Gabon

Libreville

Le RP n° 108 MHA/NP du 16 juin 2003 rend compte de l'ensemble des travaux effectués dans l'estuaire du Gabon et aux abords de Libreville durant la mission ZMAto, en septembre et octobre 2002 (BH2 *Laplace*).

Les travaux prescrits avaient pour but d'assurer le recueil et la mise à jour des informations aux abords de Libreville pour tous types de navigation.

Aucun levé bathymétrique n'a eu à être effectué, en effet, le bâtiment hydrographique américain *Henson* avait déjà récemment conduit un levé d'une durée de 6 mois dans l'estuaire du Gabon (US/SV *Henson* 3rd Qtr FY00, 4th Qtr FY00, 1st Qtr FY01 ; Archive #99US06).

Des démarches ont été engagées afin de récupérer ces données.

Les travaux aux abords de Libreville ont donc consisté en :

- calage d'une image SPOT ;
- calage d'une image Radar ;
- critique de l'information nautique existante et recueil d'informations nouvelles ;
- travaux de géodésie (calage des anciens systèmes, ...) ;
- mesures marégraphiques et courantométriques.

Port-Gentil

Les RP n° 72 MHA/NP du 10 avril 2003 et RP n° 96 MHA/NP du 26 mai 2003 rendent compte de l'ensemble des travaux effectués aux abords de Port-Gentil respectivement par le BH2 *Laplace* durant la mission ZMAto en octobre et novembre 2002 et le BH2 *Borda* durant la mission ZMAto en janvier et février 2003.

Les travaux prescrits avaient pour but d'assurer un recueil et une mise à jour des informations nautiques dans la baie du cap Lopez et aux abords de Port-Gentil :

- levé bathymétrique d'une voie recommandée et d'une partie de la zone d'approche ;
- calage d'une image SPOT ;
- critique de l'information nautique existante et recueil d'informations nouvelles ;
- travaux de géodésie (calage des anciens systèmes) ;
- mesures marégraphiques et courantométriques ;
- sédimentologie.

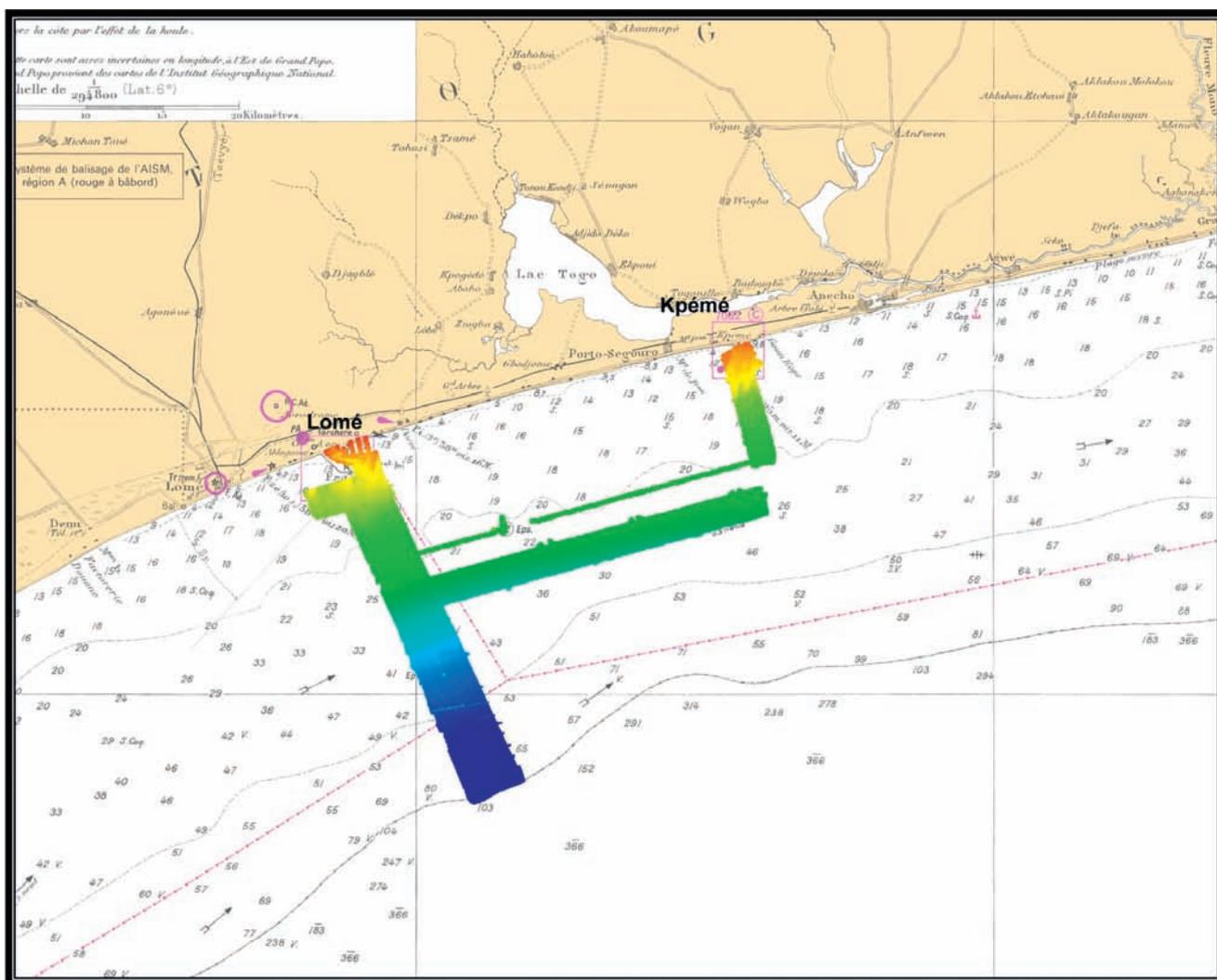
L'est de la zone ayant fait l'objet d'une utilisation industrielle anarchique, de nombreuses obstructions, non présentes sur la carte marine, ont été découvertes. Cette zone a dû être qualifiée de « zone incomplètement hydrographiée, dangereuse aux mouillages et chalutages ».

2.4.5 Levés en république du Congo

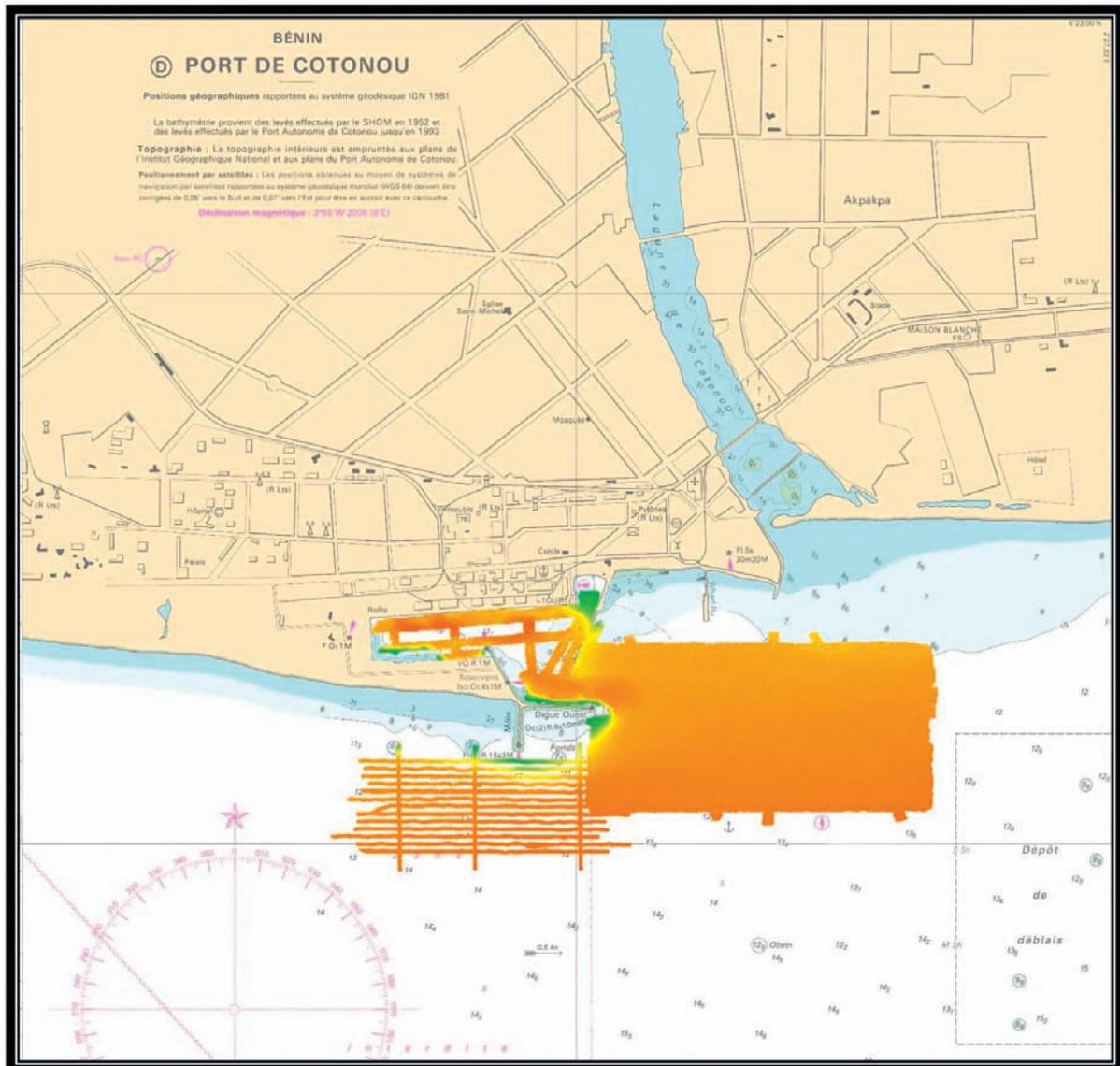
Le RP n° 115 MHA/NP du 18 juin 2003 rend compte de l'ensemble des travaux effectués aux abords de Pointe-Noire en février et mars 2003 (BH2 Borda).

Suite aux sondages, une voie recommandée d'accès au port de Pointe-Noire a été proposée. Tenant compte de la bathymétrie, de la proximité de la côte et des dangers ainsi que des besoins exprimés par le commandant du port de Pointe-Noire, une nouvelle zone de mouillage a été définie. Le levé des approches de Pointe-Noire a enfin été réalisé ainsi que des mesures de marée et de courants. Une forte érosion de la baie, de l'ordre de 100 m, a cependant rendu obsolète la scène SPOT de 1991 qui devait être exploitée pour une spatioréparation.

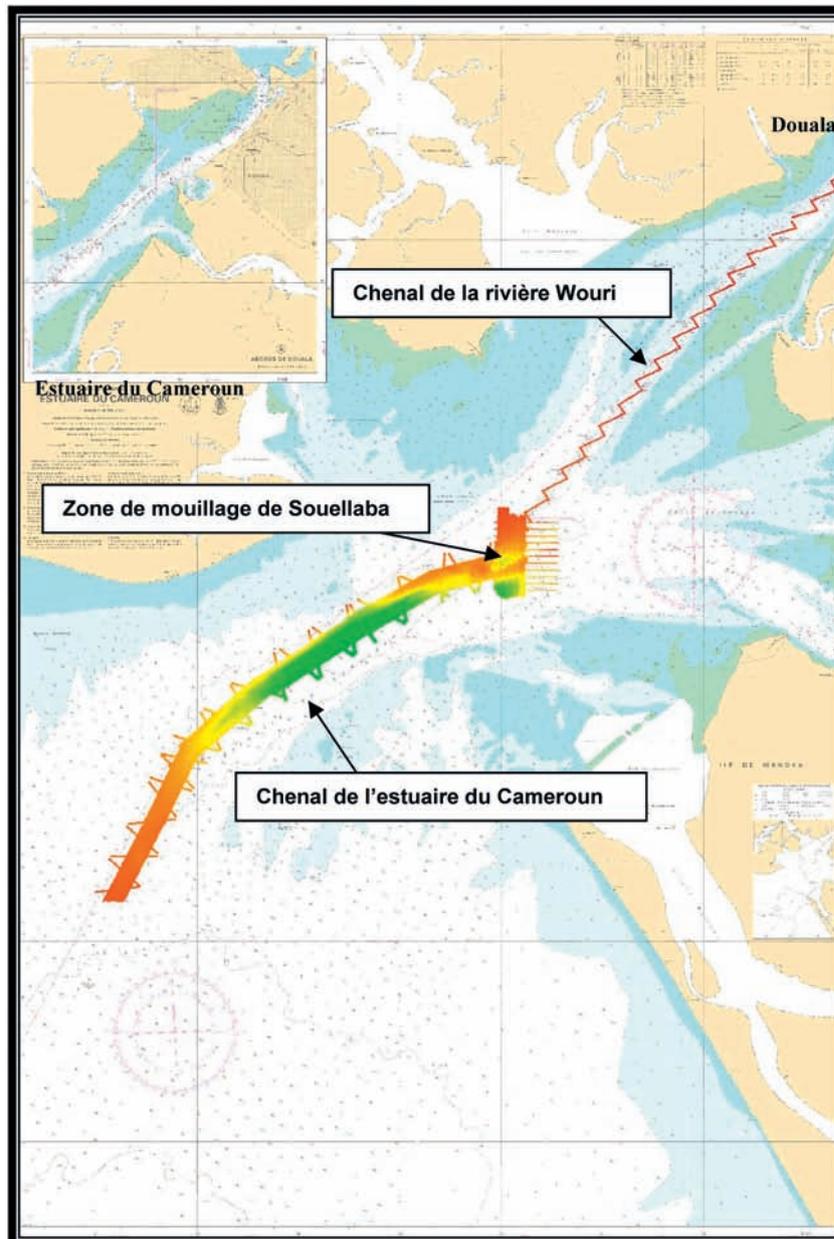
2.4.6 Planches des zones d'activité : golfe de Guinée, Atlantique sud



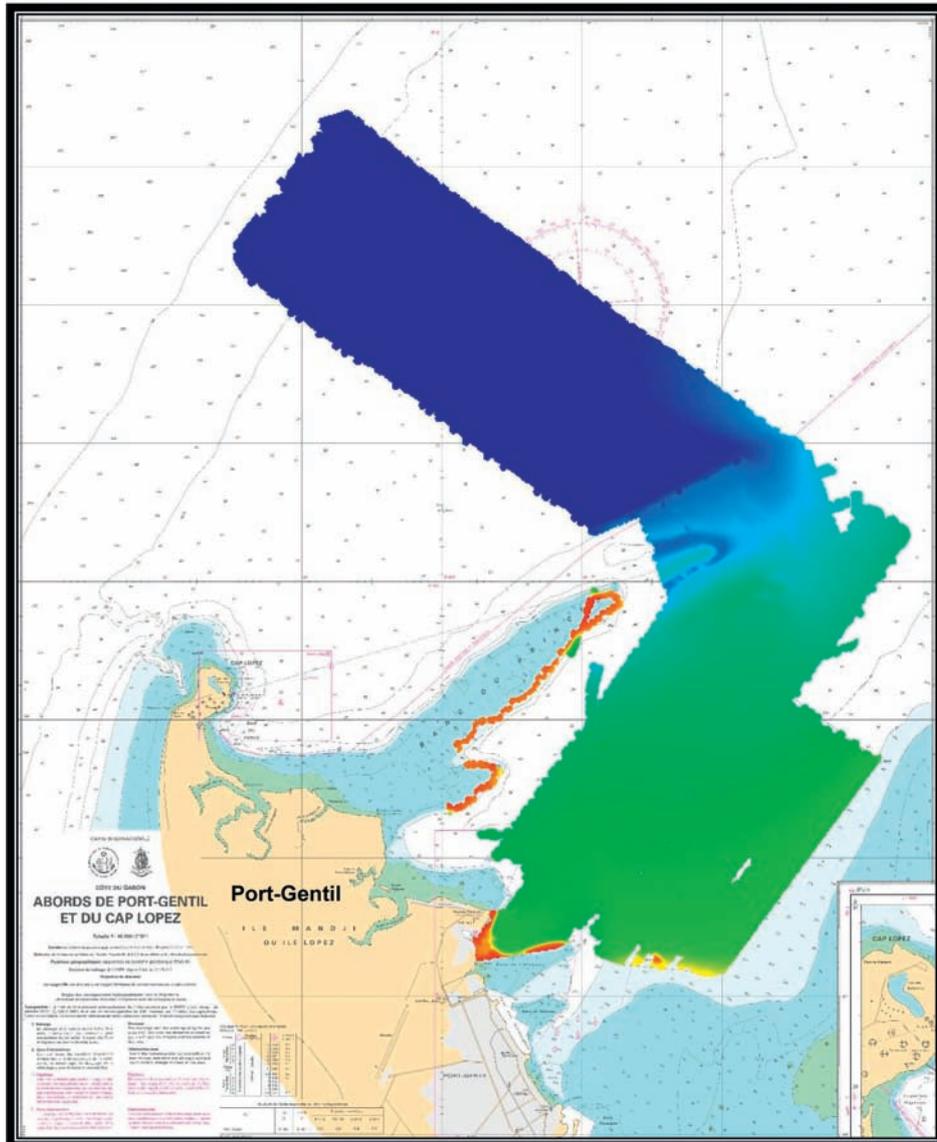
Levés au Togo



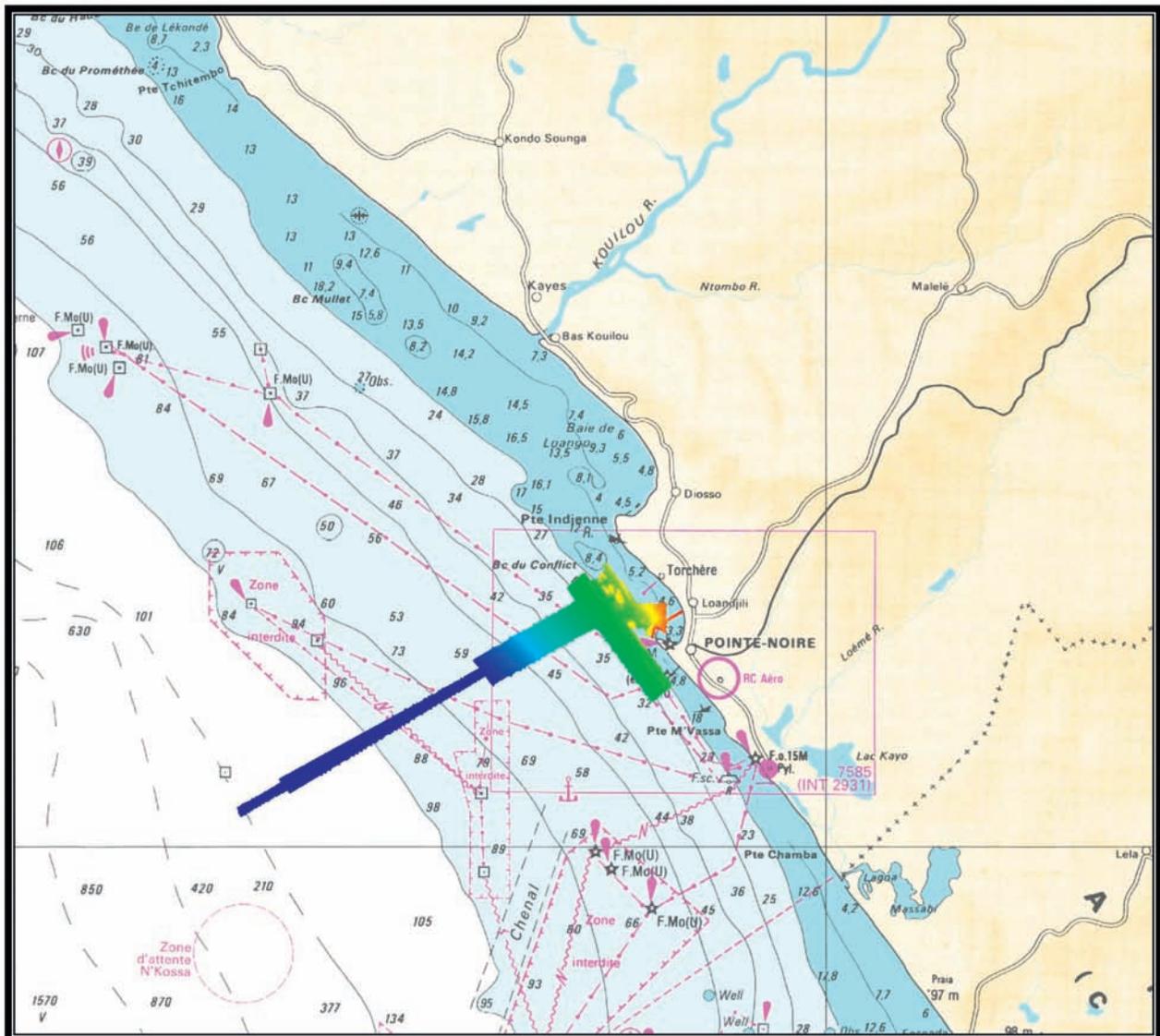
Levés au Bénin



Levés au Cameroun



Levés au Gabon



Levés en République du Congo

2.5 Antilles – Guyane

Les travaux décrits ci-dessous ont été réalisés lors d'un déploiement du BH2 *Borda* au premier semestre 2002 (la direction technique était assurée par l'ICETA Yves Guillam)

2.5.1 Levés aux abords de Saint-Martin et Saint-Barthélemy

Saint-Martin

Le RP n° 298 MHA/NP du 13 décembre 2002 rend compte des travaux effectués par la MHA aux abords de l'île de Saint-Martin en janvier et février 2002.

La connaissance hydrographique des abords de l'île de Saint-Martin était faible et souvent très ancienne : levés de reconnaissance au plomb de sonde du milieu du XIX^e siècle, excepté pour quelques rares baies bénéficiant de levés de 1950 ou 1971.

Le développement de la navigation (notamment de croisière) dans cette zone nécessitait une mise à niveau de la cartographie. Les principaux travaux réalisés sont les suivants :

- levé hydrographique de la partie française du canal d'Anguilla ;
- levé d'une voie recommandée du canal d'Anguilla au quai de Marigot et au port de Galisbay ;
- levé de la zone de mouillage des paquebots et de la baie de la Potence à Marigot ;
- revue d'amers et du balisage de Saint-Martin ;
- observation de la marée (dont observations d'un an à Marigot entre février 2002 et février 2003 consignées dans le RP n° 125 MHA/NP du 3 Juillet 2003) ;
- détermination des courants dans les canaux d'Anguilla et de Saint-Barthélemy ;
- le calage d'une image SPOT (spatiopréparation).

Saint-Barthélemy

Le RP n° 298 cité plus haut présente également les seuls travaux qui y ont été effectués à savoir des mesures de courants.

2.5.2 Levés aux abords de la Guadeloupe

Le RP n° 01 MHA/NP du 6 janvier 2003 rend compte des travaux effectués par la MHA aux abords de l'île de la Guadeloupe en février et mars 2002.

La partie côtière de la côte ouest de la Guadeloupe n'avait alors fait l'objet d'aucun levé moderne à une échelle adaptée, contrairement aux autres côtes de l'île, levées au cours de plusieurs campagnes depuis le début des années 1980.

Il s'agissait aussi de compléter les travaux de la MOA de 1999 et reprendre un levé extérieur (levé anglais SMF OCTOPUS) dont la qualité, d'un point de vue hydrographique, avait été jugée insuffisante. Les principaux travaux réalisés sont les suivants :

- achèvement du levé bathymétrique côtier de l'ouest de l'île de la Guadeloupe ;
- levé bathymétrique de l'anse Deshaies ;
- levé bathymétrique de l'anse à la Barque ;
- revue d'amers sur les zones du levé ;
- jonction entre le levé côtier ouest Guadeloupe et les levés larges existants : recherche du plateau coté 113 m sur CM 7345 ;
- sédimentologie.

Un levé bathymétrique d'opportunité au 1/5 000 a par ailleurs été conduit dans l'anse de Malendure (commune de Bouillante).

2.5.3 Levés aux abords de la Guyane

Le RP n° 278 MHA/NP du 28 novembre 2002 rend compte de l'ensemble des travaux effectués par la MHA aux abords de La Guyane.

La connaissance hydrographique de la bande côtière de la Guyane étant limitée aux accès principaux, il convenait de la compléter d'une part en achevant des travaux antérieurs (recherches) du SHOM et d'autre part en entreprenant des levés nouveaux.

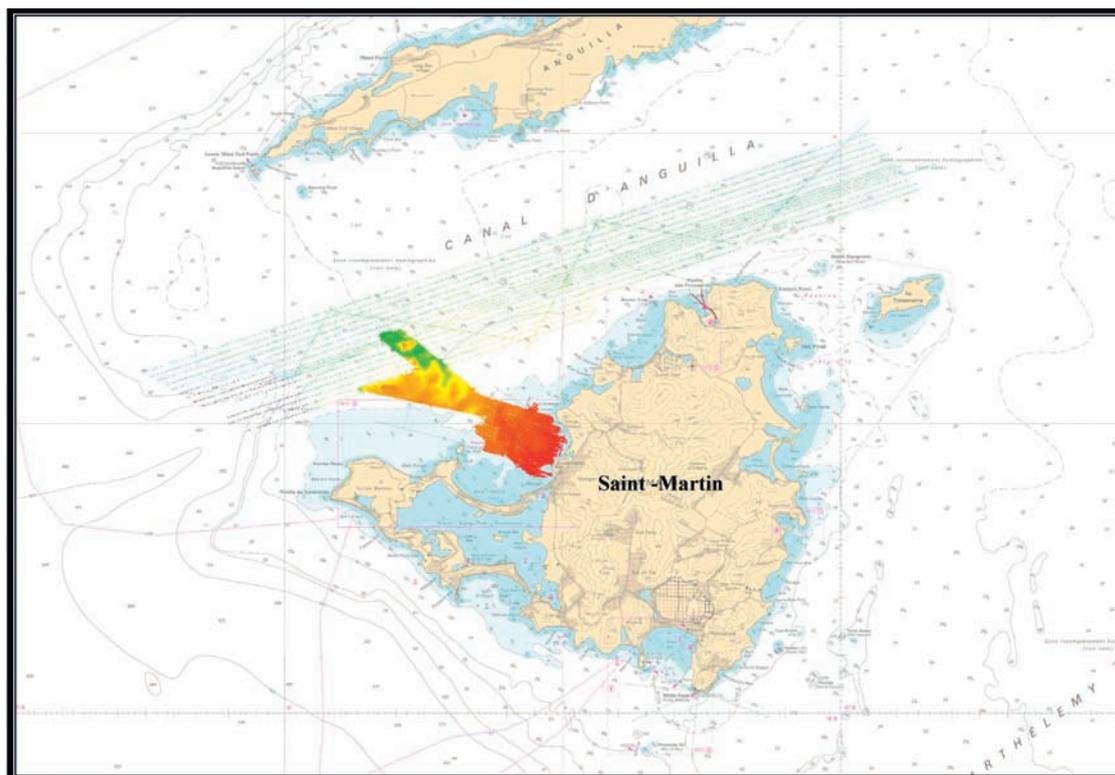
En raison de l'érosion, la côte étant l'objet de modifications importantes, son suivi devait par ailleurs être étudié par imagerie SAR (synthetic aperture radar).

Les travaux réalisés ont permis :

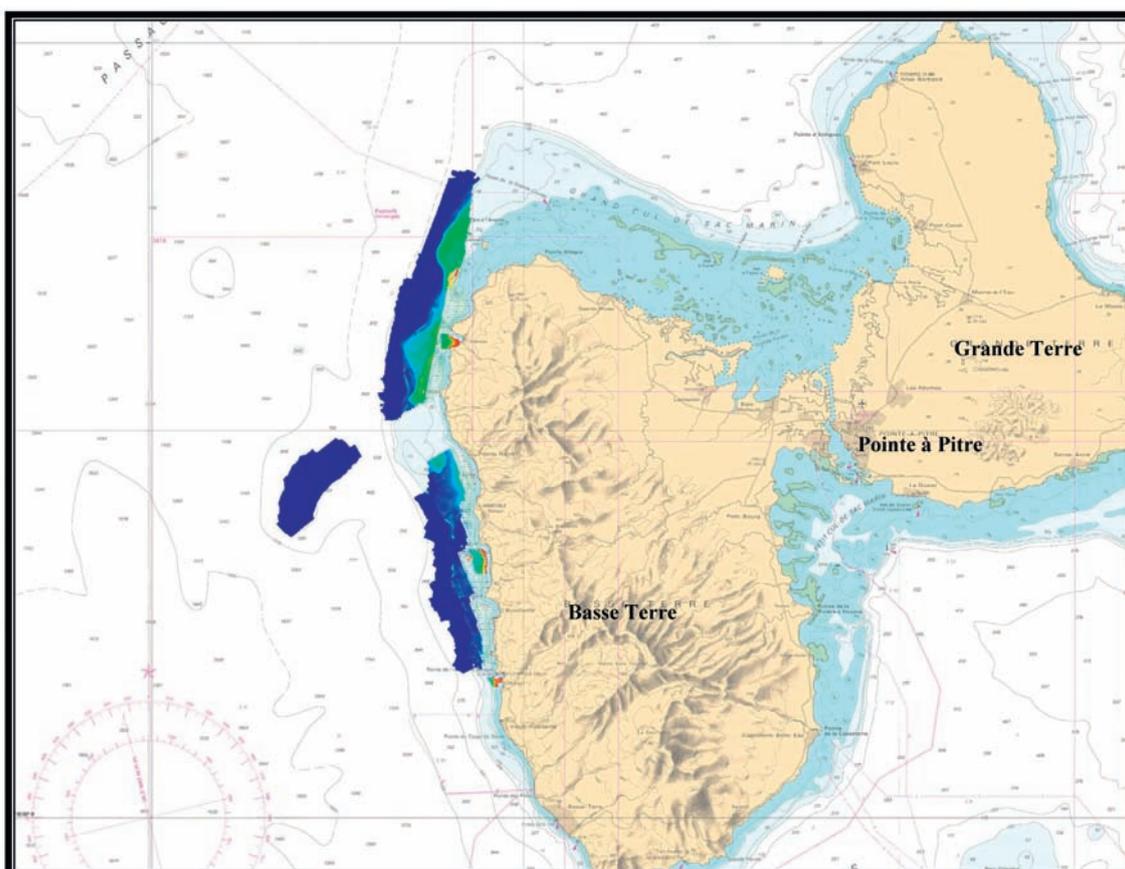
- de compléter des levés précédents du SHOM (recherches d'obstructions ou épaves) ;
- de commencer le levé côtier dans les fonds inférieurs à 5 m pour le suivi et l'étude des déplacements des bancs de vase observés par satellite dans l'estuaire du Kourou ;
- de commencer un levé côtier entre l'isobathe 5 m et les levés antérieurs déjà réalisés au voisinage des îles du Salut ;
- de recueillir des informations sur les types de côtes pour aider à l'interprétation des images SAR ;
- d'entreprendre les observations de la marée aux Hattes prévues pour couvrir une période d'un an.

Ces travaux ont en particulier permis de corriger les instructions nautiques (IN) qui préconisaient une route, entre la zone de mouillage des pétroliers et l'entrée du chenal de Kourou, passant sur deux hauts fonds.

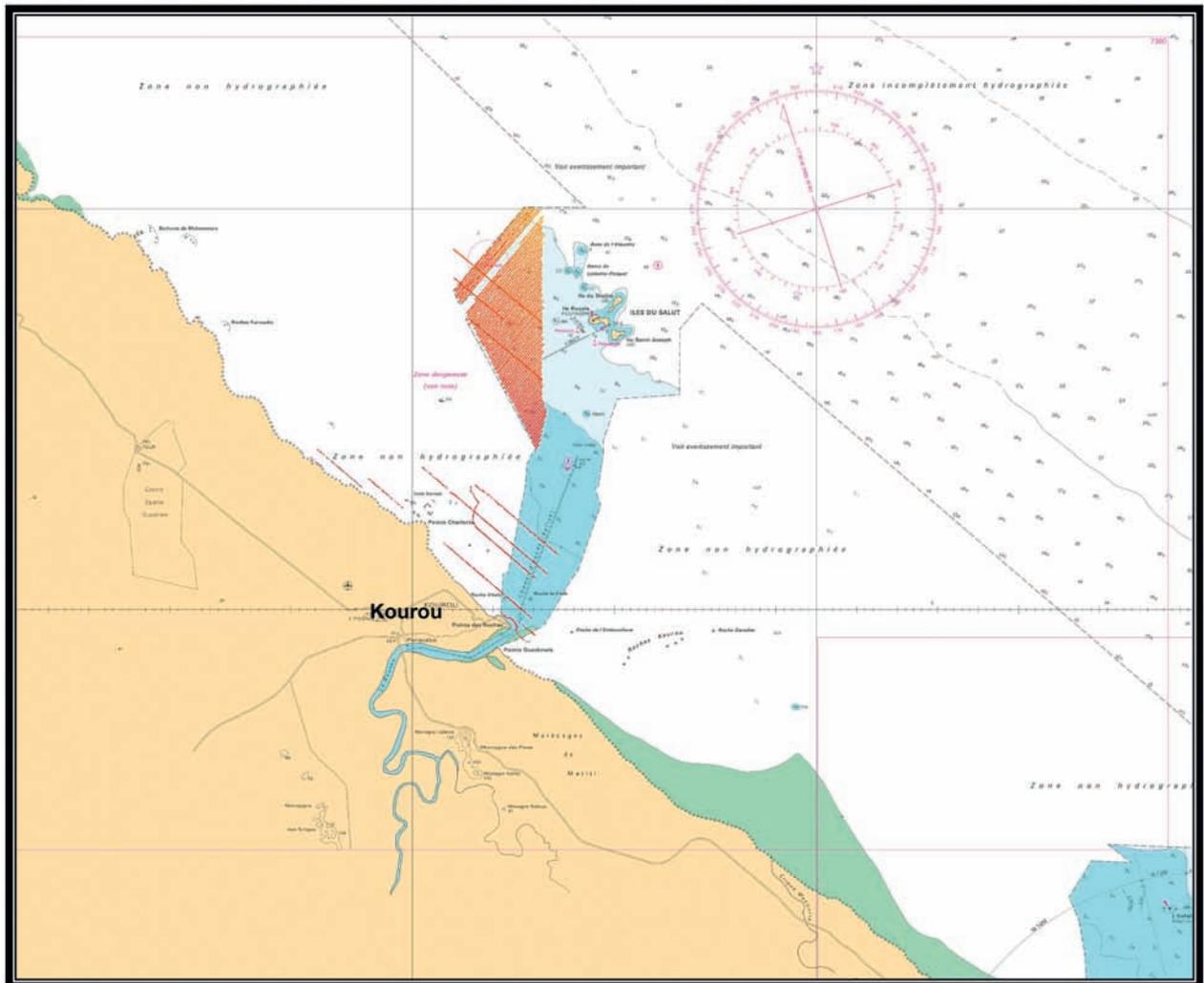
2.5.4 Planches des zones d'activité : Antilles – Guyane



Levés aux abords de Saint-Martin et Saint-Barthélemy



Levés aux abords de la Guadeloupe



Levés aux abords de la Guyane

2.6 Mer Rouge – Golfe d’Aden – Djibouti

Ce chapitre présente d’une part les travaux réalisés à l’occasion du déploiement du BH *La Pérouse* dans le sud de la mer Rouge lors du 1^{er} trimestre 2004 et d’autre part ceux du *Borda* réalisés l’année suivante.

2.6.1 Levés des ports de Djibouti et de Dorâlê

Djibouti

Les levés, demandés par le PAID (port autonome international de Djibouti) en relation avec le COMAR (commandant de la marine) de Djibouti avaient pour objectif le contrôle de dragages effectués dans le port de Djibouti. Les derniers travaux aux postes 13 à 15 dataient de 1927/1928 (sondages au plomb SHOM). Les levés ont été menés dans un premier temps à l’aide d’une coralline (sondeur Atlas Deso20, sonal sur perche) lors du passage du *La Pérouse* en 2004 (RP n° 138 MHA/NP du 12 juillet 2004) puis dans un deuxième temps par une vedette (SMF) du BH2 *Borda* en février et mars 2005 (RP n° 161 MHA/NP du 27 avril 2005).

Dorâlê

Un terminal pétrolier était en cours de construction à Dorâlê, à l’ouest de Djibouti. La connaissance hydrographique de cette zone étant issue également de sondages au plomb réalisés en 1927 et 1928, le levé hydrographique du port de Dorâlê a également été conduit par les vedettes du *Borda* (RP n° 161 MHA/NP du 27 avril 2005).

Divers

Ont également été réalisés en 2005 (RP n° 161 MHA/NP du 27 avril 2005) :

- le levé hydrographique de la passe Ouest,
- la cotation de trois épaves dans les îles Moucha,
- le calage de photographies aériennes verticales,
- une revue partielle des amers et du balisage.

2.6.2 Levés des abords de Djibouti

Le RP n° 157 MHA/NP du 29 juillet 2004 rend compte des travaux effectués en février 2004 par le BH2 *La Pérouse* aux abords de Djibouti en prévision du passage du groupe aéronaval (GAN) français. L’objectif était d’assurer la sécurité de navigation de l’accès à une zone de mouillage et de recueillir des données sédimentologiques.

2.6.3 Levés dans le golfe de Tadjoura : Obock, Ghoubbet el Kharab

La carte marine du golfe de Tadjoura était basée sur des données anciennes (sondages au plomb réalisés entre 1864 et 1889) et les déploiements successifs de bâtiments hydroocéanographiques dans cette zone devaient être mis à profit pour permettre le recueil de l’information nautique et bathymétrique, plus particulièrement aux abords des ports d’Obock et dans la passe d’entrée du Ghoubbet el Kharab. Les travaux ont été réalisés d’une part au premier trimestre 2004 avec le BH2 *La Pérouse* (RP n° 139 MHA/NP du 12 juillet 2004) et d’autre part en février 2005 avec les vedettes du BH2 *Borda* (RP n° 138 MHA/NP du 12 avril 2005). Ils viennent ainsi compléter ceux déjà effectués par la MHA en décembre 2000 - janvier 2001 et ceux de la MOA en janvier 2002 (AH 775).

2.6.4 Levés du détroit de Bab el Mandeb et ses abords

La zone comprise entre les îles Hanish et le détroit de Bab el Mandeb et son prolongement était assez mal hydrographiée et présentait de nombreux dangers. La France, responsable de l’édition des cartes internationales dans cette zone à fort trafic, souhaitait les mettre à jour.

Le RP n° 86 MHA/NP du 11 mars 2005 et le RP n° 227 MHA/NP du 3 juin 2005 rendent compte des travaux effectués par le BH2 *La Pérouse* aux abords sud du détroit de Bab el Mandeb en mars 2004. Une recherche sur l’épave (Lenaky) en PA de la carte marine 7519 a par ailleurs été conduite.

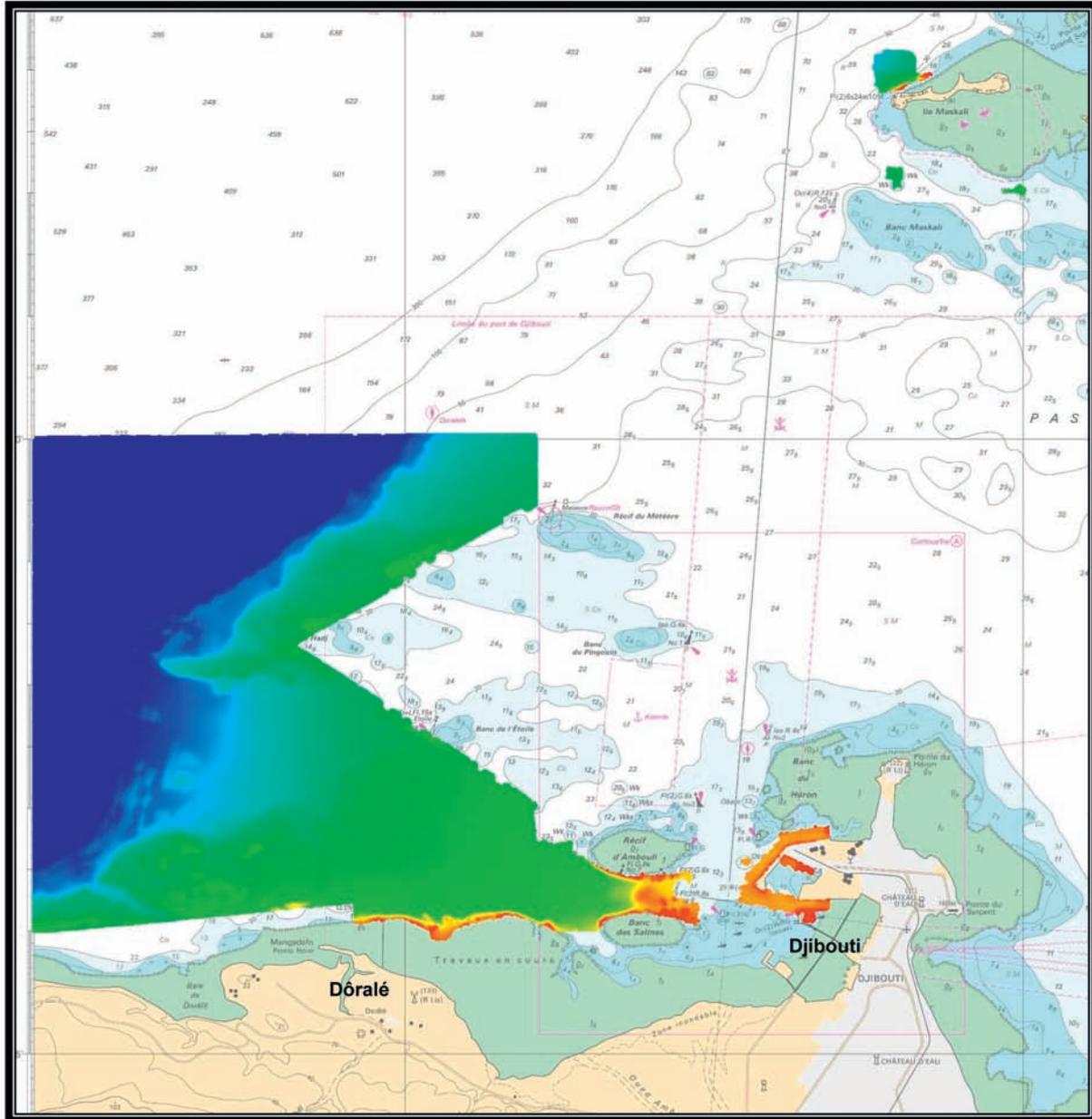
Des mesures de profil de courant ont par ailleurs été réalisées en février et mars 2005 (BH2 *Borda*) à la position 12° 35’ 20,46’’ N – 043° 28’ 18,72’’ E (WGS 84), par 51 m de profondeur. Les résultats sont consignés dans le RPS n° 149 MHR/-- du 18 avril 2005.

2.6.5 Levés aux abords des îles Hanish

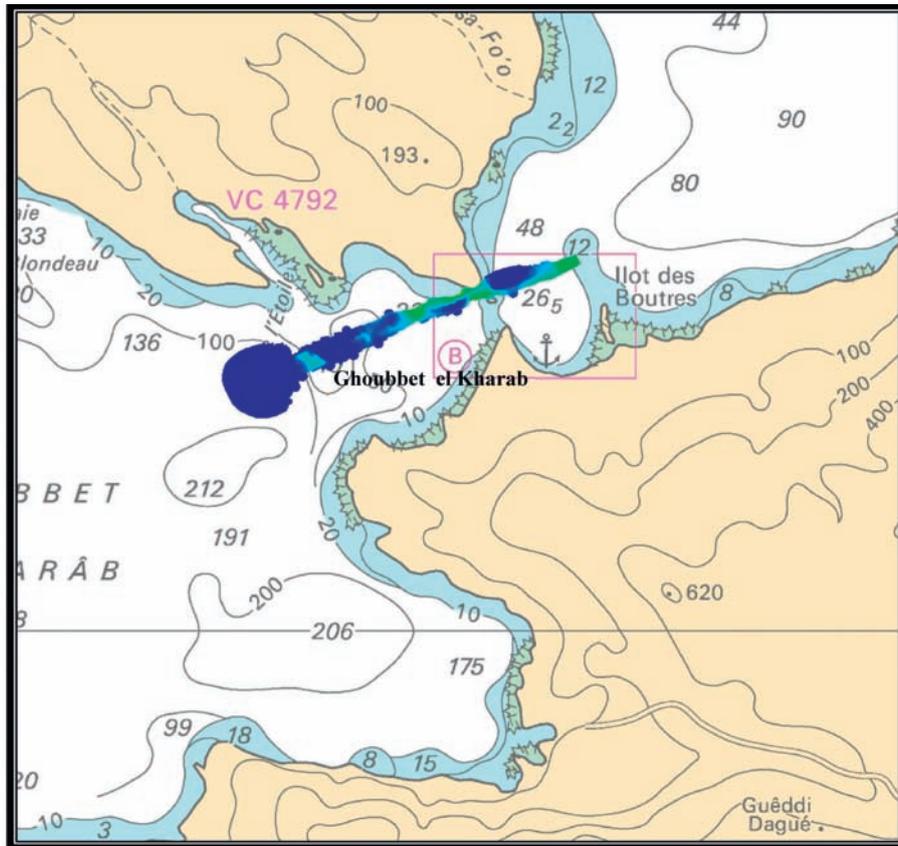
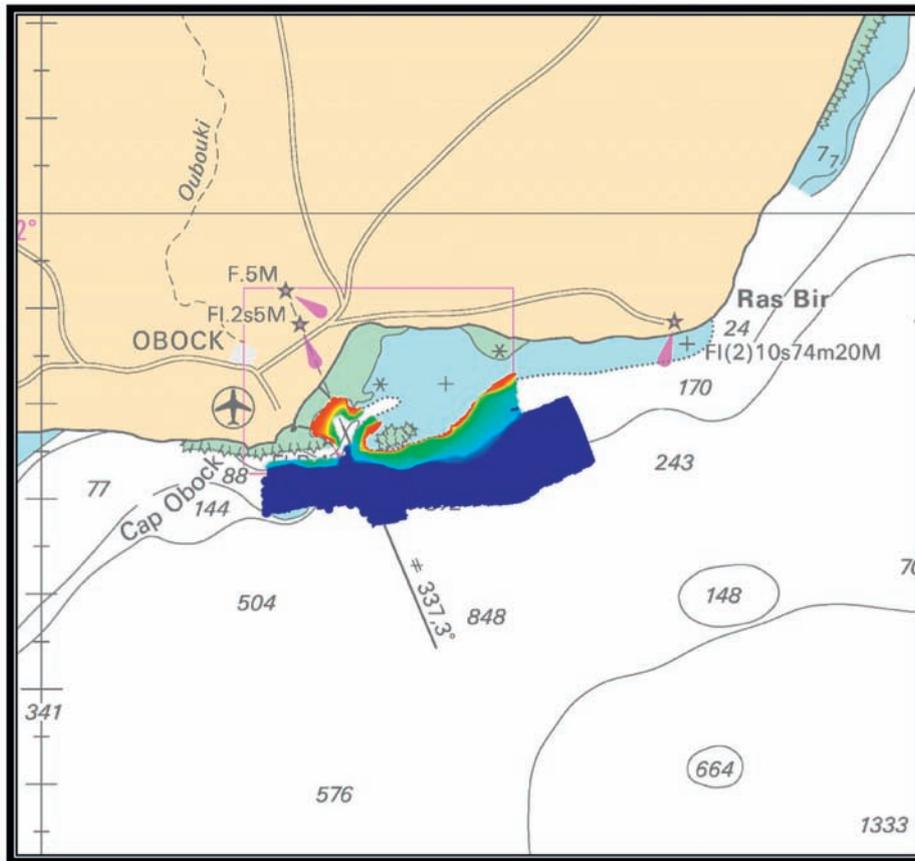
Le RP n° 242 MHA/-- du 10 juin 2005 présente les travaux réalisés par le BH2 *Borda* en février et mars 2005 dans le dispositif de séparation du trafic situé entre les îles Hanish et la côte érythréenne. Les travaux se sont déroulés dans les eaux érythréennes et yéménites.

L’autorisation de travaux dans les eaux du Yémen avait été accordée sous réserve d’accueillir à bord deux observateurs, officiers de la marine yéménite. L’Érythrée avait autorisé la réalisation du levé sans conditions particulières. Les observateurs yéménites n’étaient pas à bord pendant les sondages dans les eaux érythréennes.

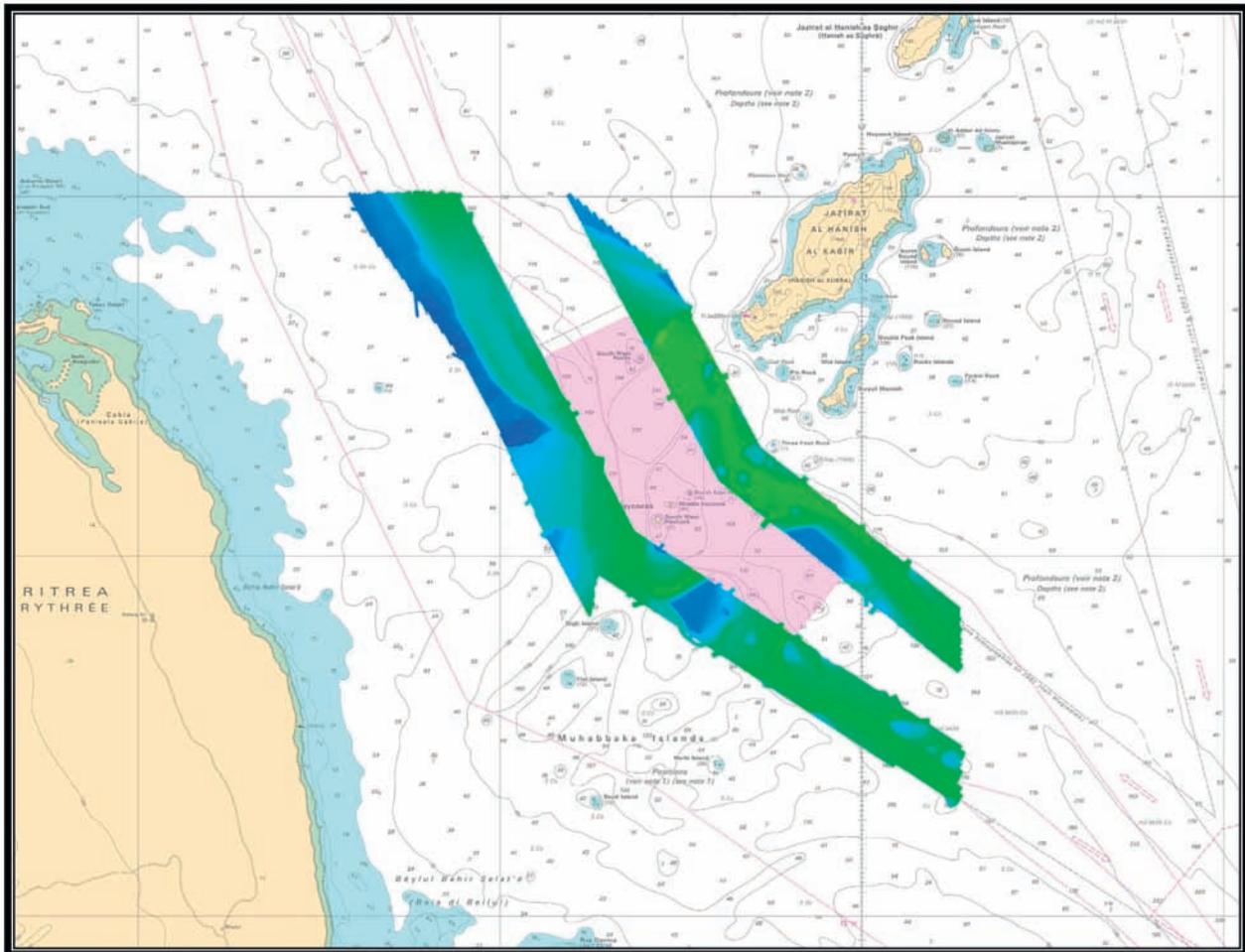
2.6.6 Planches des zones d'activité : mer Rouge – Golfe d'Aden – Djibouti



Levés des ports de Djibouti et Dôralé
Levé des abords de Djibouti



Levés dans le golfe de Tadjoura : Obock, Ghoubbet el Kharab



Levés aux abords des îles Hanish

2.7 Kerguelen

Ces travaux, menés début 2003 à bord de *La Curieuse* par une très petite équipe d'hydrographes, sont décrits dans un chapitre spécifique de ces AH 776.

2.8 Zones diverses

2.8.1 Atlantique ouest : campagne de mesure d'éclairement nocturne

Le RP n° 18 MHA/NP du 22 janvier 2003 rend compte des mesures effectuées entre septembre 2002 (départ de Brest) et décembre 2002 (retour à Brest), à bord du *Laplace*, lors de son déploiement en Afrique de l'ouest.

Les travaux hydrographiques du *Laplace* l'obligeant à rester dans la zone côtière, fortement affectée par les lumières des villes, les mesures au luxmètre n'ont été réalisées que durant les transits. Elles avaient lieu toutes les heures entre 20h00 et 04h00 locales pendant une période de 5 minutes d'extinction des feux du bord dès lors que la sécurité de la navigation le permettait.

Ces travaux s'inscrivaient dans le cadre d'études des conditions d'utilisation optimale des jumelles de vision nocturne afin de valider les résultats obtenus à partir de diverses méthodes de prévision développées par la cellule de développement météo air (CDMA).

2.8.2 Atlantique ouest : projet CORIOLIS

Dans le cadre du projet CORIOLIS (acquisition et traitement de données hydrologiques) des tirs Sippican ont été réalisés lors du transit du *Laplace* en Afrique de l'ouest en 2002 (dont mise à l'eau de flotteurs Provor) ainsi que celui du *La Pérouse* en mer Rouge en 2004.

2.8.3 Manche – Golfe de Gascogne : marégraphie, courantométrie

De nombreux travaux de marégraphie inhérents à la bathymétrie sont consignés dans les rapports relatifs aux levés hydrographiques décrits ci-dessus.

Ce chapitre énumère les travaux de marégraphie (mise en place de repères, leur nivellement, rédaction d'une fiche d'observatoire de marée, observation de longues durées, etc.) réalisés indépendamment de tels levés.

Deux séries de mesures de courants sont également inventoriées (zone d'Arcachon)

De nombreux travaux étaient associés au programme RONIM (réseau d'observatoires du niveau des mers) d'installation de marégraphes côtiers numériques (MCN).

Ports et zones concernés :

Le Havre (MCN) :

- RPS n° 66 MHA/NP du 15 février 2005 ;
- RPS n° 191 MHA/NP du 18 mai 2005 ;
- RPS n° 375 MHA/NP du 26 octobre 2005.

Cherbourg (MCN) :

- RPS n° 13 MHA/NP du 15 janvier 2003.

Ile de Bréhat (RPS n° 69 MHA/NP du 16 février 2005) :

- phare de la Croix (mesures en mars puis novembre/décembre 2004, mesures également utilisées dans le cadre du levé de la rivière du Trieux) ;
- Port Clos (première série d'observations connues en janvier/février 2005).

Saint-Malo :

- RPS n° 120 MHA/NP du 25 juin 2003 (5 séries de mesures de marée continues de novembre 2001 à février 2003) ;
- RPS n° 68 MHA/NP du 18 mars 2003 (3 séries de mesures de marée continues de février à octobre 2003 date d'installation d'un MCN).

Roscoff :

- RPS n° 101 MHA/NP du 3 juin 2003 (installation de repères avant mise en place MCN et mesures de marée par marégraphes plongeurs : 4 séries continues entre janvier 2002 et septembre 2002) ;
- RPS n° 50 MHA/NP du 27 janvier 2005 (5 séries de mesures de marée entre février 2003 et septembre 2004 date de la mise en service du MCN) ;
- RPS n° 210 MHA/NP du 25 mai 2005 (contrôle MCN).

Douarnenez :

- RPS n° 229 du 8 juin 2005 (observations de marée en avril/mai 2005 afin d'améliorer les prédictions).

Concarneau :

- RPS n° 113 MHA/NP du 17 juin 2003 (dans cadre installation d'un MCN).

Arcachon, entrée du bassin : RPS n° 140 MHA/NP du 12 avril 2005 :

- une série de mesures de marée à l'entrée du bassin en juillet 2004 ;
- deux séries de mesures de courants au cap Ferret et à la pointe d'Arcachon.

Boucau – Bayonne (MCN) :

- RPS n° 284 MHA/NP du 17 novembre 2004 (contrôle quinquennal).

3. MOYENS FLOTTANTS, VÉHICULES

3.1 Moyens flottants

3.1.1 Bâtiments

BH2

Généralités

Ils étaient tous équipés d'un SMF petits fonds, de sondeurs verticaux petits et grands fonds, d'un sonar latéral remorqué,

d'un sondeur de sédiments, du système RoxAnn de classification des fonds et d'un magnétomètre remorqué.

Spécificités

- Le *Laplace* et le *Borda* pouvaient embarquer chacun deux vedettes hydrographiques ;
- le *La Pérouse* disposait d'une propulsion électrique lui donnant des aptitudes particulières pour la tenue de stations fixes d'océanographie en mer.

Le tableau ci-dessous reprend les principales caractéristiques des unités. Les effectifs sont ceux des plans d'armement de 2003.

Unité	Déplacement	Entrée en service	PERSONNEL			Total
			Officiers	Officiers mariners	Equipage	
BH2 <i>Borda</i>	900	1988	3	13	16	32
BH2 <i>La Pérouse</i>	900	1988	3	15	14	32
BH2 <i>Laplace</i>	900	1989	3	12	15	30

La tenue à la mer des trois BH2 était insuffisante quand l'état de mer dépassait 3 (activité hydrographique réduite voire annulée).

Comme en témoigne les faibles productivité de 2002 (réalisation de 77 % des jours prévus) et surtout 2003 (57 %), les BH2 connurent de très nombreuses difficultés matérielles que les services de soutien (SSF : service de soutien de la flotte ; AMF : ateliers militaires de la flotte) ne pouvaient pas (même en «cannibalisant» les BH2 et le BEGM : bâtiment d'essais de la guerre des mines *Thétis* entre eux) toujours régler dans les temps. Parmi les principales avaries on pourra surtout signaler celle des réducteurs qui concernèrent les trois BH2.

Ceux du *Borda* furent changés à titre préventif.

L'emploi des BH2 s'organisa essentiellement au profit de la MHA, quelques semaines furent cependant consacrées à des activités de service public comme la surveillance du *Tricolor* (ferry qui avait coulé dans le Pas de Calais) alors qu'elles étaient initialement prévues pour l'hydrographie.

Les caractéristiques initiales des BH2 peuvent être consultées dans les *Annales Hydrographiques n° 765 de 1992* (rapport MHA de G. Bessero dont son annexe spécifique sur les BH2 rédigée par J.M. Chimot).

BH2 Borda

Le BH2 *Borda* fut successivement commandé (1 an) par le CC Lamour de Caslou, le CC Guy et le CC Alin.

Le *Borda* était jusqu'en 2003 pourvu de deux vedettes hydrographiques de 8 mètres (VH8) équipées chacune d'un sondeur vertical et d'un sonar latéral. Ces vedettes furent ensuite remplacées par des modèles neufs (voir chapitre suivant). De nouveaux bossoirs monobras équipèrent alors le BH2.

Le *Borda* aura eu une excellente disponibilité pendant la période considérée. Seul un incident nautique, en 2004 au large de Bayonne, aura perturbé son programme.

BH2 Laplace

Le BH2 *Laplace* fut successivement commandé (1 an) par le CC Salmon, le LV Bailly et le LV Legros. Comme le *Borda*, le *Laplace* fut équipé en 2003 de nouveaux bossoirs et de nouvelles vedettes Fassmer.

Le *Laplace* eu une bonne disponibilité sauf en 2003 dû à un incident nautique lors de son retour de Brème l'obligeant à changer ses réducteurs.

Le *Laplace* participa à la mission SAR (search and rescue) suite au naufrage du ferry *Joola* au large du Sénégal. Cette mission d'assistance aux bateaux sénégalais et de récupération de très nombreux corps fut très éprouvante. Tout l'équipage du bâtiment et l'équipe de la MHA embarquée montra un bel exemple de courage largement salué en particulier par le COMFOR (commandant des forces françaises) du Cap Vert puis les autorités sénégalaises.

BH2 La Pérouse

Le BH2 *La Pérouse* fut successivement commandé (1 an) par le CC Calvo, le LV Reina et le CC Pappens

La disponibilité du *La Pérouse* fut globalement médiocre sauf en 2004 et dans une moindre mesure en 2005.

Le *La Pérouse* avait la particularité d'être équipé d'un treuil d'hydrologie et d'une propulsion auxiliaire électrique lui permettant d'assurer la tenue de stations au point fixe en mer.

Le sonar DUBM21 du bord, qui n'était plus exploité, fut démantelé début 2005.

Autres bâtiments

Les levés conduits aux Kerguelen en coopération avec les TAAF (terres australes et antarctiques françaises) et l'IPEV (institut polaire français Paul Emile Victor) ont été réalisés à partir du NO *La Curieuse*.

Le BSAD *Argonaute* de la Surf (affrété par la marine) fut utilisé pour des opérations de mouillages océanographiques.

3.1.2 Vedettes hydrographiques

La mission devait connaître un renouvellement complet des vedettes hydrographiques qu'elle employait.

Situation avant 2003 :

- deux VH8 de 8 mètres vétustes et sous équipées (monofaisceau) utilisées plus particulièrement avec le BH2 *Borda* ;
- une VH9 (*La Foi*) vétuste et également sous équipée (monofaisceau) de 9 mètres ;
- une VH90 de 10 mètres qui fut principalement utilisée par la MOA et qui possédait un SMF petits fonds, le Fansweep 20.

Situation après 2003 :

Quatre nouvelles vedettes Fassmer (nom du chantier naval allemand) embarquées sur :

- le *Borda* (*Macareux*, *Phaéton*) ;
- le *Laplace* (*Guillemot*, *Goéland*).

Caractéristiques des vedettes Fassmer :

Coque :

- longueur hors tout : 7,85 m ;
- largeur hors tout : 2,72 m ;
- tirant d'eau : 1m ;
- déplacement : 4 tonnes ;
- vitesse maximale : 17 nœuds ;
- rayon d'action : 109 milles nautiques ;
- matériau : aluminium.

Propulsion :

- Volvo Penta AD41DP, 125 kW de 3 250 tours/minute ;
- Water jet type Vospower PP Model 115 (AMJET Model 115).

Equipements scientifiques :

- un sondeur multifaisceau très petits fonds Simrad EM 3002 ;
- un sondeur monofaisceau Simrad EA400 ;
- systèmes de positionnement et de mesure d'attitudes : GPS différentiel ou cinématique de type Thalès navigation Aquarius, POS/MV3 ;
- capacités d'investigation avec engins remorqués : sonar latéral Edgetech et magnétomètre de type Thalès SMM II ;
- célérimètre de coque SV Smart et bathycélérimètre autonome Mors.

Pour différentes raisons de gestion ou de disponibilité, les VH, mêmes si elles étaient affectées à un BH2, pouvaient passer d'un bâtiment à un autre selon une procédure de prêt de matériel entre BH2. Ces VH normalement employées avec le soutien logistique d'un BH2 pouvaient potentiellement être aussi utilisées de façon entièrement autonome dès lors que des possibilités d'avitaillement et d'hébergement existaient. L'accès aux zones de travail s'opérant alors par un navire de transport, par leurs propres moyens ou enfin par convoi exceptionnel par la route. Dans ce dernier cas des moyens de hissage devaient être disponibles sur place.

Ces vedettes connurent des problèmes de jeunesse dont certaines auraient pu être évitées par une politique de maintien en condition opérationnelle (MCO) plus préventive et surtout l'emport de pièces de rechange en nombre suffisant. Un manque d'expertise embarquée conduisit « par précaution » à des arrêts d'exploitation.

La MOA (et non les BHO qu'elle employait) disposait au même moment de trois vedettes hydrographiques du même type qui connurent moins de déboires. Ces vedettes étaient affectées à la MOA, leur emploi et leur entretien étaient confiés à des manœuvriers et des mécaniciens de la mission.

3.1.3 Coralline

Consacrer un chapitre à une coralline peut surprendre, il n'en demeure pas moins qu'elle fut très utilisée d'une part pour conduire des levés par très petits fonds à partir du BH2 *La Pérouse* qui n'était pas équipé de vedette et d'autre part pour réaliser des levés de plages ou portuaires (tous BH2).

3.2 Véhicules

La MHA disposait :

- de deux véhicules légers : une Renault Laguna et une Citroën Xsara ;
- deux fourgonnettes Citroën Berlingo ;
- deux Boxers Peugeot ;
- un camion plateau Renault.

4. ÉQUIPEMENTS SCIENTIFIQUES

Ce chapitre rappelle les principaux équipements utilisés par la mission. On ne saura trop rappeler l'importance de la logistique dans le succès des opérations. Celles-ci devaient être parfois conduites simultanément sur les trois bâtiments dans des zones très éloignées. Le MCO des équipements était assuré soit à la mission (service logistique à terre ou embarqué) soit à l'EPSHOM (pour l'essentiel) soit à la DCN (direction des constructions navales) pour les sonars latéraux Edgetech et leurs câbles. Le service logistique de la MHA fut dirigé par les IETA Scourzic et Beuchard.

L'emploi de ces équipements fut précisé dans des procédures rédigées en liaison avec les services concernés de l'EPSHOM afin de consolider et valider différents savoir-faire. Ces procédures ont concerné : les SMF des BH2 (mise en œuvre, calibration, traitement, MCO), les sonars latéraux (utilisation, MCO), l'observation de la marée, la conduite des levés et l'élaboration des documents définitifs. La formation du personnel fut assurée au meilleur niveau tout particulièrement pour mieux maîtriser les outils « SMF » (traitements plus particulièrement) et ceux des bathysondes (autonomies des équipes d'hydrographes du *La Pérouse*).

Ces activités de rédaction devaient contribuer à la mise en place du nouveau système de management de la qualité (SMQ) du SHOM selon la norme ISO 9001 : 2000 pour les activités concernant la sécurité de la navigation c'est à dire, avec le recueil des données hydrographiques, la part essentielle de l'activité de la MHA. Ce SMQ devait être certifié conforme en 2004.

4.1 Localisation, géodésie, topographie

La localisation était réalisée au GPS avec des récepteurs Dassault - Sercel Aquarius 5002 (LRK : cinématique temps réel), NR 103, Ashtech Z12 et MLR FX412.

Des POS/MV 320 V3 furent installées sur les nouvelles vedettes pour délivrer simultanément les informations de position et d'attitude nécessaires à l'exploitation des SMF. Sur BH2, les centrales inertielles HDMS furent progressivement remplacées par des POS/MV 320 V3 afin d'améliorer le service et d'uniformiser le matériel.

Des dispositifs DGPS pouvaient être activés (par satellite avec Seastar ou par station terrestre : UHF avec station NDS100 et HF avec station NDS200, LRK avec station d'émission Aquarius).

La mission disposait de niveaux électroniques Leica NA 3003 pour les nivellements géométriques.

4.2 Marégraphie, bathymétrie

Marégraphie

La marée pouvait être observée par des marégraphes plongeurs autonomes installés dans des cages petits ou grands fonds : SLS 23 de Suber, OT660 de Mors. En métropole, la marée exploitée pour la réduction des sondages était cependant souvent issue de modèles en provenance de l'EPSHOM (modèles alimentés par les mesures de marée de la MHA ou celles d'observatoires permanents).

Bathymétrie

BH2

Les BH2 étaient tous équipés de SMF EM1002S (débridés ensuite en EM1002) associés à des centrales d'attitude HDMS (puis à des centrales inertielles POS/MV 320 V3). Ces SMF faisaient l'objet d'un contrat de maintenance avec le constructeur (Simrad) comportant annuellement des mises à jour (logicielles et matérielles), suivies d'essais et de calibrations.

Les SMF faisaient l'objet d'un contrôle de calibration avant chaque mission.

Les BH2 étaient également équipés de sondeurs monofaisceaux grands fonds (Raytheon puis Simrad EA600) et petits fonds (Atlas Deso 20 puis Simrad EA400).

Vedettes

Les vedettes du *Borda* et du *Laplace*, au départ simplement équipées de sondeurs monofaisceaux Atlas Deso20 puis EA400 (33 et 210 kHz) furent, entre 2003 et 2004, dotées de SMF EM3000 (puis 3002).

Les données du SMF, celles de tous les capteurs associés (récepteur GPS Aquarius ; centrale d'attitude et de cap POS/MV ; célérimètre de coque) celles du bathycélérimètre (Mors SV510) étaient acquises par le logiciel Merlin (EM3000) puis Sis (EM3002) de Simrad.

Nota : la mise en œuvre des sondeurs pouvait être accompagnée (cas très courant) de moyens de détections d'obstructions à savoir le magnétomètre et le sonar latéral.

4.3 Géophysique

4.3.1 Magnétisme

Les mesures étaient réalisées avec un magnétomètre SMM II de Thomson.

4.3.2 Sédimentologie

Différents moyens pouvaient être utilisés :

- le sonar latéral EGG TD272 et 260 TH (la MHA ne bénéficia que tardivement du système d'acquisition et de traitement numérique Isis Sonar et dû se contenter trop longtemps d'enregistrements analogiques) ;
- le système RoxAnn de classification des fonds interfacés aux bases des sondeurs verticaux ;
- la benne de prélèvement (« Shipeck » pour BH2, « Van Veen » pour VH) ;
- le sondeur de sédiment CESP IIIT (BH) ;
- les plongeurs (observations visuelles, prélèvements manuels).

4.4 Océanographie

4.4.1 Courantométrie

Les mesures de courantométrie furent conduites aux points fixes avec des profileurs de courants à effet Doppler ADP Nortek (500 kHz) ou ADCP RDI (300 kHz et 1 200 kHz) installés dans des cages ou des courantomètres à rotor Suber SLS 21 ou Nortek Aquadopp installés sur des lignes de mouillage.

Certains mouillages autonomes de courantomètres profileurs furent équipés de turbidimètres.

4.4.2 Bathysondages

Bathysondes

Des nombreuses bathysondes (ex : SBE911) furent mises en œuvre pendant les campagnes d'océanographie (*La Pérouse*). Ces bathysondes étaient équipées de rosettes (prélèvements chimiques et biologiques) ainsi que de différents capteurs permettant de mesurer les profils verticaux de courant (L_ADCP), le rayonnement, la fluorimétrie (chlorophylle et hydrocarbures), la transmissiométrie, la granulométrie...

Bathycélérimètres

Des bathycélérimètres (Mors SV510 puis Valeport SVP200) ont également été utilisés pour les besoins de la bathymétrie.

Sondes perdables

Des sondes perdables Sippican XBT ou XCTD furent utilisées lors des campagnes d'océanographie (système d'acquisition MK21).

4.4.3 Divers

Différentes bouées dérivantes furent mises à l'eau : Surdrift (droguées à 75 m), Woce (droguées à 15 m), APEX et CMOD.

Des disques de Secchi et spectro - radiomètres furent aussi utilisés.

4.5 Systèmes d'acquisition et de traitement de données

Acquisition

Les principaux systèmes d'acquisition de données étaient les suivants :

- Aqidoc_NG (Deso20) ;
- Hypack (acquisition de la localisation bord, monofaisceau, RoxAnn, magnétomètre) ;
- Merlin acquisition SMF bord (Simrad) ;
- Sis SMF EM3002 des vedettes ;
- Sealog (marée) ;
- Seasave de Seabird (bathysondes) ;
- Isis Sonar (sonars latéraux) ;
- Delph Seismic (sondeur de sédiments).

Traitement

Les principaux systèmes de traitement de données étaient les suivants :

- Tradoc (Deso20) ;
- Hypack (sonar latéral) ;

- Circe (traitement de la bathymétrie SMF) ;
- Pegase (modèles numériques de terrain, choix surfaciques) ;
- Odicce (SMF) ;
- Caris Gis, Hips et Sips ;
- Caraibes ;
- Isis Sonar (sonar latéraux) ;
- Timica (marée) ;
- Hydroceane (bathysondes) ;
- Bathycel ;
- Argos, Caraibes (contrôle qualité) ;
- Logiciel Geogenius version 2000 (géodésie) ;
- Amtiop pour la génération de fichiers au format pivot.

4.6 Informatique, réseaux, télécommunications

Des réseaux informatiques embarqués étaient mis en place avec les équipements informatiques classiques (stations, PC, traceurs, imprimantes, supports de stockage importants...).

Des connexions Inmarsat (courriel, fichiers) étaient par ailleurs disponibles sur les BH2 via des stations Inmarsat B.

5. ORGANISATION DE L'ACTIVITÉ

5.1 Contexte général

Outre les BH2 avec lesquels la MHA était en co-activité permanente, la mission était essentiellement en interface avec la direction du SHOM, ALFAN (amiral commandant la force d'action navale) et l'EPSHOM.

Concernant ALFAN (autorité organique des BH2), les relations étaient « en théorie » de type clients/fournisseurs, il n'y avait en effet aucun flux financier. Ces relations s'exerçant d'ailleurs dans les deux sens, le SHOM étant à fois client (plateformes à la mer) et fournisseur (produits d'environnement, documents nautiques) d'ALFAN.

Au sommet commun du SHOM et d'ALFAN, il y avait l'EMM (état major de la marine) l'une des deux tutelles du SHOM (l'autre étant la DGA : direction générale de l'armement), qui était informé de l'activité et de l'emploi des moyens lors des réunions de concertation et d'orientation (major général de la marine) et celles du conseil de gestion (chef d'état major de la marine).

L'activité de la MHA se devait par ailleurs d'être conforme au SMQ du SHOM qui devait répondre aux exigences de la norme ISO 9001:2000 (certificat obtenu en 2004).

5.1.1 La MHA et la direction du SHOM

La mission recevait un programme annuel auquel elle devait rendre compte mensuellement (compte rendu périodique d'activité : CPA) et annuellement (rapport annuel d'activité) en justifiant les écarts entre les prévisions et les résultats. Une attention particulière était portée aux principaux indicateurs de production à savoir les potentiels navires utilisés ainsi que les unités d'œuvre consommées des personnels hydrographes.

Ces indicateurs étaient ensuite synthétisés trimestriellement par le bureau SHOM/EM (établissement - missions) de la direction du SHOM et enfin annuellement d'une part au profit du major général de la marine lors des réunions de concertation et d'orientation (RCO) vers décembre et d'autre part au chef d'état major de la marine lors des conseils de gestion vers juin.

Les écarts entre prévisions et réalisations furent parfois importants : potentiel OMH réduit (les travaux à la mer étaient privilégiés au détriment de la rédaction des levés), activités imprévues (Vigimer, *Tricolor*), indisponibilité des BH2, de leurs vedettes, sous-estimation de travaux de traitement de données, conditions météorologiques...

5.1.2 La MHA, les BH2 et ALFAN

Modalités de concertation

Ces modalités entre les BH2, leur autorité organique (ALFAN), la MHA et son autorité organique (DIRSHOM) étaient essentiellement précisées dans un protocole co-signé en juillet 2002 par le directeur du SHOM et ALFAN. Ce protocole précisait les conditions de planification, de conduite des activités, du maintien en condition opérationnelle, de qualification et de notations.

Dans la pratique, c'est au travers d'un dialogue permanent entre d'une part les ingénieurs de la mission et les officiers des bords, en premier chef le directeur de mission et les commandants, et d'autre part les officiers marins de la mission et leurs homologues du bord que la concertation prenait toute sa dimension opérationnelle et humaine.

Nombre de jours de mers

Le nombre de jours de mer (pas nécessairement sous propulsion principale) autorisé (défini à partir de la loi de finance, environ 110 j en moyenne pour la marine) était de 135 jours. On peut noter que ce nombre était de 150 jours en 1991 (date d'évolution du plan d'armement des bords) et de 160 jours en 1988/89 lors de l'ASA (admission au service actif) des BH2.

Directives annuelles

La directive d'ALFAN (commune à tous ses bâtiments BH2 compris) rappelait les objectifs stratégiques hiérarchisés suivants :

1. Satisfaction des besoins exprimés par les autorités d'emploi ;
2. préservation du patrimoine ;
3. respect et évolution de la réglementation.

Ces objectifs étaient ensuite déclinés par ALFAN comme suit (la réponse que la MHA pouvait apporter est donnée) :

- « **Obtenir des clients l'expression de leurs besoins avec le plus grand préavis possible** »

L'organisation mise en place dans le cadre du protocole SHOM/ALFAN permettait de définir un premier projet de programme au mois de septembre de l'année N pour l'année N+1. Les missions de longues durées étaient planifiées selon un plan triennal ;

- « **Obtenir la prise en compte par les clients des impératifs de préservation du patrimoine** »

Dans la mesure où moins les BH2 étaient présents à la mer plus le patrimoine était potentiellement préservé cet objectif était, en première approche du moins, incompatible avec ceux de la MHA dont la production était directement proportionnelle au temps passé à la mer (loi de finance évoquée plus haut qui ne tenait pas compte des spécificités de production des BH2).

Prise en compte des conditions météorologiques

Il y avait maintenant des intérêts communs à éviter de travailler dans les conditions les plus difficiles en particulier quand la météo était très défavorable à la fois pour la qualité du travail et la préservation du matériel.

Prise en compte du risque d'incident nautique

Les travaux hydrographiques à conduire qui pouvaient entraîner des risques de navigation (par nature les travaux sont souvent menés dans des zones insuffisamment hydrographiées) étaient évidemment toujours présentés aux commandants. Un partage des tâches est alors fait entre les BH et leurs vedettes.

Prise en compte de l'usure des équipements

L'organisation de l'activité tenait compte des impératifs d'entretien de moteurs (et de leur ménagement) en planifiant du travail vedette (bâtiment au mouillage ou dans un port à proximité) et du travail sur une seule ligne d'arbre.

- « **Affecter aux missions les unités les mieux adaptées** »

Les choses étaient assez simples dans la mesure où les 3 BH avaient des capacités assez comparables (aux VH près du *Borda* et du *Laplace*, aux capacités hydrologiques près du *La Pérouse*).

La direction du SHOM veillait de son côté à la meilleure distribution possible des objectifs de travaux à la mer entre MHA et MOA en tenant compte des moyens flottants de ces deux missions (respectivement le côtier et l'hauturier).

Maintien en condition opérationnelle

Les conditions de maintien en condition opérationnelle (MCO) des équipements spécifiquement dédiés aux opérations hydro-océanographiques furent précisées dans un projet (néanmoins officiel) d'instruction daté de novembre 2003. Il permettait en particulier de bien préciser la responsabilité du MCO des matériels embarqués selon qu'ils étaient SHOM ou bord (ex : vedettes, treuils...), le MCO revenant alors au SSF (service de soutien de la flotte).

5.2 Responsabilités à bord

Fonctions de directeur de mission

Ces fonctions de directeur de mission (chef de formation, direction opérationnelle) concernaient l'exécution du programme annuel d'activité contractualisé en assurant en particulier la planification des bâtiments à la mer et l'échelonnement des travaux. Lorsqu'il n'était pas à bord (cas courant avec 3 BH) cette fonction (bon déroulement général d'une sortie à la mer) était déléguée au commandant.

Fonction de directeur technique

Ces fonctions de directeur technique (direction et contrôle technique) concernaient la bonne exécution (qualité et productivité) des travaux prescrits en dirigeant le personnel de

l'unité hydrographique et en contrôlant la qualité du travail (organiser et réaliser les levés selon les règles de l'art). Lorsqu'il n'était pas à bord cette fonction était déléguée à un hydrographe certifié selon des critères de l'organisation hydrographique internationale (en général un ingénieur).

Activité hydro-océanographique

Il s'agissait d'une activité partagée aussi bien par le bord (passerelle, appareils de manœuvre) que par l'équipe de la MHA embarquée (PC scientifique).

La mise en œuvre des appareils de manœuvre pouvait être partagée par le bord et la MHA selon le personnel non hydro (mécanicien) qu'elle pouvait embarquer.

La participation de personnel mission à la mise en œuvre des appareils de manœuvre et des vedettes, qui ne pouvait être permanente, était potentiellement source de conflit d'autant plus qu'elle pouvait en outre laisser penser que leur MCO revenait à la mission.

Les équipes de plongée étaient enfin quasiment toujours mixtes (MHA, bord) aussi bien pour les besoins bord qu'hydrographiques.

Quelques matelots, quartiers-maîtres voire seconds maîtres manifestèrent de l'intérêt pour l'hydrographie et obtinrent le certificat d'aide hydrographe, sésame qui fut utile à certains d'entre eux pour accéder au cours du brevet supérieur d'hydrographe.

5.3 Planification

Cette planification des sorties à la mer des BH tenait compte :

- des objectifs du programme annuel pour la MHA. Ces objectifs étaient on l'a vu contractualisés dans un budget de gestion ;
- du protocole SHOM/ALFAN ;
- des périodes d'entretien programmées des bâtiments [plan local entretien pour les PEI (8 semaines par an a priori non fractionnables) et plan d'entretien majeur pour les IE, IEL (tous les 35 mois) et IPER (tous les 75 mois)]. Il fallait tenir compte des heures d'emploi des moteurs entre différentes périodes d'entretien sachant que le temps passé à la mer pouvait être augmenté en employant une seule ligne d'arbre ou en employant les VH, les BH étant alors à quai ou au mouillage (*Borda, Laplace*). La propulsion électrique du *La Pérouse* permettait aussi des économies de potentiel ;
- des périodes programmées d'entretien des équipements lourds hydro-océanographiques (sondeurs, ...) qui étaient normalement en phase avec celles des bâtiments ;
- des périodes d'entraînement des bâtiments ;
- des potentiels d'emploi accordés aux bâtiments :
 - ce potentiel était limité d'une part par des contraintes d'heures de marche des moteurs et d'autre part par des contraintes d'absence (1 seul équipage par BH). Pour réussir 135 jours (moyenne par an) d'hydro-océanographie par an hors port de base il fallait planifier au moins 140 j, auxquels devaient être ajoutés les jours d'autorité organique destinés aux entraînements bords et aux

escales non hydrographiques. L'ensemble étant diminué au prorata des indisponibilités périodiques pour entretien et réparation (IPER).

- de principes d'organisation des sorties à la mer à savoir :
 - des sorties de 2 semaines assorties d'une petite escale de repos de 1 jour (2 nuits) ;
 - des sorties d'une durée comprise entre 3 à 5 semaines si une escale longue durée (3 à 4 j) était prévue à l'étranger ;
 - des missions entrecoupées de périodes à quai d'une à deux semaines mises à profit pour remettre à niveau le matériel et conduire si nécessaire des essais à quai ou en mer ;
 - des missions lointaines (Afrique) d'au moins 3 mois. Ces missions prévoyaient des escales de plus longue durée que la normale mises à profit pour nouer des contacts avec les autorités locales et conduire des travaux vedettes bâtiment à quai ;
 - prise en compte des saisons (météorologie) sachant cependant que le mois d'août était néanmoins réservé aux permissions.

6. CONCLUSIONS

Quelques chiffres

Le nombre de jours de mer réalisés aura été de (années complètes) :

- 270 j en 2002 (77 % des jours planifiés) ;
- 200 j en 2003 (57 % des jours planifiés) ;
- 360 j en 2004 (91 % des jours planifiés) ;
- 340 j en 2005 (86 % des jours planifiés).

L'objectif était de réaliser 90 % des jours planifiés.

Le nombre de projets d'avis urgents aux navigateurs (années complètes) fut de :

- 24 en 2002 ;
- 9 en 2003 ;
- 16 en 2004 ;
- 23 en 2005.

60 rapports (hors levés de plage et marégraphie) furent enfin rédigés pendant la période considérée.

L'amélioration continue

Malgré les efforts consentis, le maintien en condition opérationnelle des BH2 et de leurs vedettes restait en 2005, sans conteste, le souci principal auquel des solutions d'amélioration devaient encore être trouvées. Ajouté aux limitations d'emploi des bâtiments pour raisons budgétaires (loi de finances) la mission se trouvait en définitive avec des capacités réelles d'intervention à la mer très en deçà du potentiel que le nombre de flotteurs disponibles pouvait laisser entrevoir.

Côté matériel hydro-océanographique, on a pu voir que les conditions d'acquisition à la mer s'étaient progressivement améliorées même si certains équipements comme les sonars latéraux à capacité d'acquisition et de traitement numériques furent tardivement mis en service. On a pu également noter que les capacités de détection pouvaient être insuffisantes pour des travaux très spécifiques comme les recherches de petits objets (ex : ancres, chaînes) par fonds

d'une trentaine de mètres. La nécessité de fiabiliser les systèmes de mesures immergés ou remorqués afin de réduire les pertes de matériels - la « fortune de mer » ne pouvant toujours être invoquée – restait aussi une préoccupation très forte.

Bien que beaucoup trop tardive, l'acquisition de quatre nouvelles vedettes excellemment équipées est, en terme de moyens, ce qui aura le plus marqué les capacités de la MHA. Associé à du personnel compétent et motivé, la qualité et la quantité de travail fourni se sont ainsi considérablement améliorées.

Face à la complexité grandissante des nouveaux équipements comme les SMF, de leurs logiciels de traitement en particulier pour les petits fonds, des méthodes sans cesse améliorées de calibration, de qualification et de réduction des sondes (modèles de marée), il fallait en permanence être très attentif à leur maîtrise et capitaliser les expériences, un challenge qui fut quotidien.

ANNEXE : Liste des rapports des levés et campagnes

RP : rapport particulier (RPS si simplifié)

RC : rapport de campagne

N° des chapitres	Objets	Références
	Mer du Nord - Manche	
2.1.1	Contrôles des zones évolutives du pas de Calais	
	Contrôle décennal Zone E	RP n° 174 MHA/NP du 03/07/02
	Contrôle décennal Zone PdC1	RP n° 283 MHA/NP du 08/12/03
	Contrôle décennal Zone PdC3	RP n° 20 MHA/NP du 13/01/04
	Contrôle décennal Zone PdC4	RP n° 133 MHA/NP du 11/04/05
	Contrôle annuel Dunes F	RP n° 241 MHA/NP du 29/10/03
	Contrôle annuel Dunes F, Gne et D	RP n° 311 MHA/NP du 01/12/04
2.1.2	Levés de Calais et Dunkerque	
	Chenal d'accès à Calais	RP n° 185 MHA/NP du 09/09/02
	Zone d'attente des ports de Dunkerque et Calais	RP n° 83 MHA/NP du 06/04/04 RP n° 23 MHA/NP du 12/01/05
	Levés de zones diverses	
2.1.3	Levé de contrôle du site du naufrage du <i>Tricolor</i>	RP n° 71 MHA/NP du 21/02/05
2.1.4	Revue d'amers du Havre à Rouen	RP n° 190 MHA/NP du 18/05/05
2.1.5	Levé aux abords du cap de la Hague	RP n° 143 MHA/NP du 15/07/03
2.1.6	Levé de Lannion au raz Blanchard	
	Zone nord : boîtes 1 à 6 – Recherches d'épaves	RPS n° 132 MHA/NP du 08/07/03
	Zone nord : boîte 1 à 6 - Reprises sur levé régulier	RPS n° 278 MHA/NP du 08/12/03
	Zone nord : boîtes 10 à 18	RP n° 23 MHA/NP du 15/01/04
	Zone nord : boîtes 7 à 9.1	RP n° 46 MHA/NP du 17/02/04
	Zone centre : boîte 9	RP n° 295 MHA/NP du 24/11/04
	Zone centre : boîtes 1 à 4	RP n° 40 MHA/NP du 24/01/05
	Zone centre : boîte 5	RP n° 110 MHA/NP du 29/03/05
	Zone sud-est : boîte 1	RP n° 296 MHA/NP du 24/11/04
2.1.7	Campagne océanographique EPEL 2003	
	Rapport de campagne océanographique EPEL	RC n° 54 MHA/NP du 19/03/03
	Levé bathymétrique EPEL	RP n° 230 MHA/NP du 22/10/03
	Iroise – Golfe de Gascogne	
2.2.1	Levé de Brest	
	Levé du port militaire de Brest - Penfeld	RP n° 225 MHA/NP du 24/09/02
2.2.2	Levé en mer d'Iroise	
	Boîte 1	RP n° 205 MHA/DR du 02/09/02
	Boîtes 2 et 3	RP n° 150 MHA/NP du 18/04/05
	Compléments aux levés de 1998-1999	RPC n° 163 MHA/DR du 02/09/04
	Levés en sud Bretagne	
2.2.3	Stéréopréparation des îles de Glénan	RPS n° 276 MHA/NP du 15/11/04
2.2.4	Levé d'accès au port d'Argol à Hoëdic	RP n° 186 MHA/NP du 13/05/05

N° des chapitres	Objets	Références
	Levés au Pertuis d'Antioche La Rochelle	
2.2.5	Campagne d'étude géophysique pertuis d'Antioche - Spat	RP n° 237 MHA/NP du 07/10/02
2.2.6	Levé d'accès au port de La Rochelle – Boîtes 1, 2 et 4	RP n° 18 MHA/NP du 10/01/05
2.2.7	Levés à Biarritz – Bayonne - Boucau	
	Levé hydrographique aux abords de Bayonne	RP n° 001 MHA/NP du 03/01/05
	Revue d'amers et du balisage de Biarritz à Boucau	RPS n° 305 MHA/NP du 29/11/04
	Campagnes d'océanographie	
2.2.8	MODYCOT 2002	RC n° 258 MHA/NP du 25/10/02 RP n° 296 MHA/NP du 11/12/02
2.2.8	MODYCOT – TURBI 2003.1	RC n° 79 MHA/NP du 23/04/03 RP n° 99 MHA/NP du 11/06/03).
2.2.10	MOUTON	RC n° 145 MHA/NP du 16/07/04 RP n° 153 MHA/NP du 23/07/04
2.2.10	MOUTON - CONGAS 2005	RP n° 291 MHA/NP du 21/07/05
2.2.9	OPTIC – PCAF2004.1	RC n° 339 MHA/NP du 15/12/04 RP n° 76 MHA/NP du 24/02/05
2.8.3	Manche – Golfe de Gascogne Marégraphie -Courantométrie	
	Le Havre	RPS n° 66 MHA/NP du 15/02/05 RPS n° 191 MHA/NP du 18/05/05 RPS n° 375 MHA/NP du 26/10/05
	Cherbourg	RPS n° 13 MHA/NP du 15/01/03
	Bréhat – Phare de la Croix – Port Clos	RPS n° 69 MHA/NP du 16/02/05
	Saint-Malo	RPS n° 120 MHA/NP du 25/06/03 RPS n° 68 MHA/NP du 18/03/04
	Roscoff	RPS n° 101 MHA/NP du 03/06/03 RPS n° 50 MHA/NP du 27/01/05 RPS n° 210 MHA/NP du 25/05/05
	Douarnenez	RPS n° 229 MHA/NP du 08/06/05
	Concarneau	RPS n° 113 MHA/NP du 17/06/03
	Arcachon (dont mesures de courants)	RPS n° 140 MHA/NP du 12/04/05
	Boucau- Bayonne	RPS n° 284 MHA/NP du 17/11/04
	Portugal	
2.3.1	Participation du <i>Borda</i> à l'expérimentation MREA 04	RP n° 177 MHA/NP du 09/09/04
	Afrique : golfe de Guinée – Atlantique sud	
2.4.1	Togo	
	Travaux hydrographiques aux abords de Lomé (Togo)	RP n° 104 MHA/NP du 06/06/03
	Travaux hydrographiques au Togo	RP n° 207 MHA/NP du 21/09/04

N° des chapitres	Objets	Références
2.4.2	Bénin	
	Levé hydrographique au Bénin – ZMATO 2004	RP n° 329 MHA/NP du 08/12/04
2.4.3	Cameroun	
	Travaux hydrographiques au Cameroun	RP n° 249 MHA/NP du 18/06/05
2.4.4	Gabon	
	Port-Gentil (<i>Laplace</i> 2002 + complément <i>Borda</i> 2003)	RP n° 72 MHA/NP du 10/04/03
	Port-Gentil (<i>Borda</i> 2003)	RP n° 96 MHA/NP du 26/05/03
	Libreville (<i>Laplace</i> 2002)	RP n° 108 MHA/NP du 16/06/03
2.4.5	Congo	
	Pointe-Noire (<i>Borda</i>)	RP n° 115 MHA/DR du 18/06/03
2.8.1	Divers	
	Mesure de l'éclairement nocturne (<i>Laplace</i> 2002)	RP n° 18 MHA/NP du 22/01/03
	Antilles – Guyane	
2.5.1	Levé aux abords de Saint-Martin et Saint-Barthélémy)	RP n° 298 MHA/NP du 13/12/02
	Compléments (marégraphie et recherche d'épaves)	RP n° 125 MHA/NP du 03/07/03
2.5.2	Levé aux abords de la Guadeloupe	RP n° 001 MHA/NP du 06/01/03
2.5.3	Levé aux abords de la Guyane	RP n° 278 MHA/NP du 28/11/02
	Mer Rouge - Golfe d'Aden - Djibouti	
2.6.1	Ports de Djibouti et de Dorâlé	RP n° 138 MHA/NP du 12/07/04 RP n° 161 MHA/NP du 27/04/05
2.6.2	Abords de Djibouti : levé au profit du GAN	RP n° 157 MHA/NP du 29/07/04
2.6.3	Golfe de Tadjoura : Obock, Ghoubbet el Kharab	RP n° 139 MHA/NP du 12/07/04 RP n° 138 MHA/NP du 12/04/05
2.6.4	Abords du détroit de Bab-el-Mandeb : - Partie sud - Partie nord et détroit - Courantométrie	RP n° 227 MHA/NP du 23/02/05 RP n° 86 MHA/NP du 11/03/05 RPS n° 149 MHA/NP du 18/04/05
2.6.5	Abords des îles Hanish	RP n° 242 MHA/NP du 10/06/05
	Iles Kerguelen	
2.7	Travaux hydrographiques aux îles Kerguelen – Campagne 2003 (voir article spécifique de ces AH 776)	RP n° 137 MHA/NP du 10/07/03

ENCARTS PHOTOGRAPHIQUES

ENCART N° 1 : La vie à bord d'un BH2



La « Cafétéria »



Le carré « Commandant »



Le carré « Officiers Mariniers »



La cuisine



L'infirmerie



La plage arrière à l'occasion d'un barbecue



L'avant poste



Le poste bâbord des seconds maîtres

ENCART N° 2 : La passerelle et les machines d'un BH2



La passerelle ou abri de navigation



Le SENIN¹, outil d'aide à la navigation



Le point sur la carte marine est toujours de rigueur

¹ Système d'Exploitation Naval des Information Nautiques



Le PC machines



Les moteurs principaux

ENCART N° 3 : Les vedettes hydrographiques

Installation et essais des bossoirs



BH2 *Borda* à Brême (Allemagne - mai et juin 2003) pour mise en place des bossoirs monobras et réception des VH.



Equipements « bord »



Tableau de bord



Commande de propulsion

Ensemble du poste de pilotage



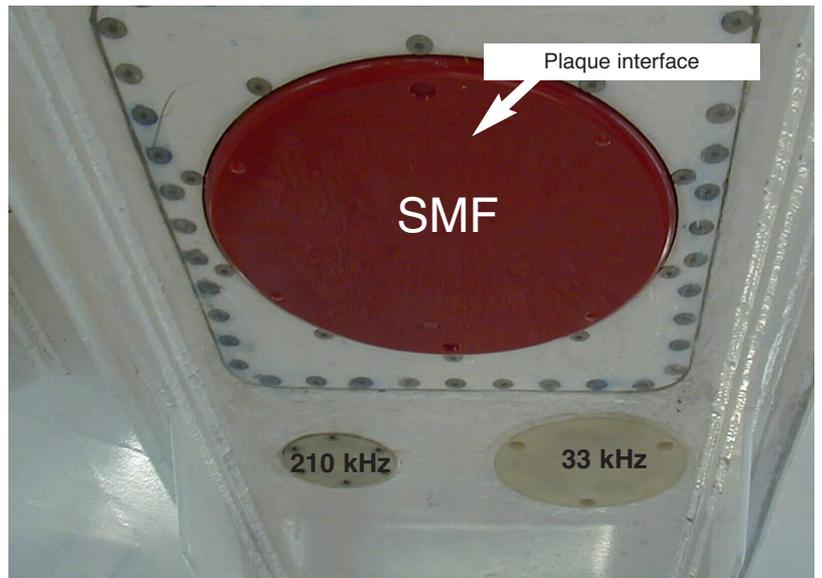
Moteur à l'arrière de la VH



Tableau général d'alimentation électrique

Equipements « hydro »

Les bases sondeurs



Ecran PC centrale d'attitude (gauche)



Ecran PC SMF (droite)

Les antennes des VH



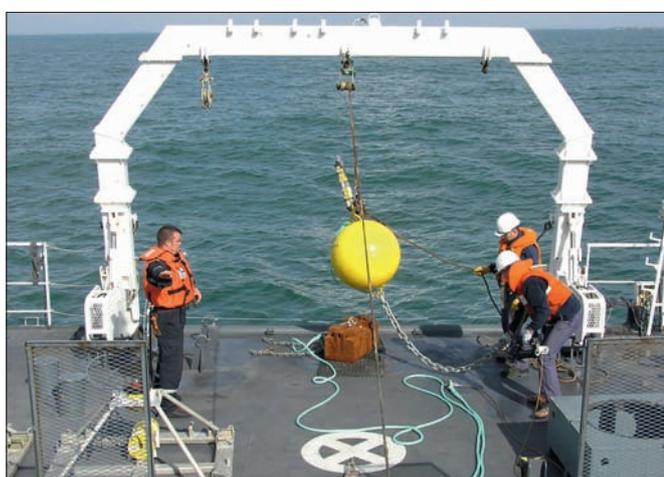
ENCART N° 4 : Les travaux hydrographiques



Mise à l'eau d'une bathysonde de jour...



... comme de nuit



Mouillage d'une bouée depuis le bord...



...puis récupération depuis un zodiac



Remontée du filet à plancton



Mise à l'eau d'un courantomètre



Mise à l'eau du sonar latéral (Sonal)

Levé hydrographique en vedettes



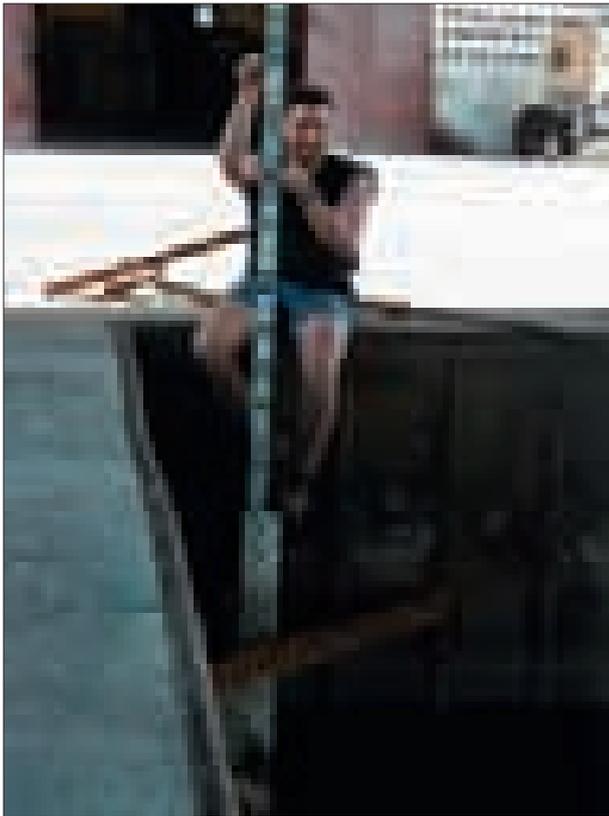
Préparation avant sondage



Mesure au bathycélérimètre



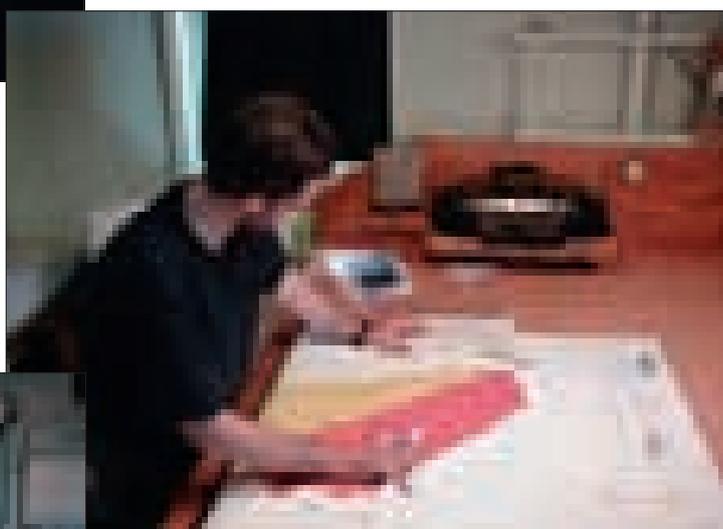
Coralline en sondage



Travaux terrain : nivellement, géodésie, topographie...



Briefing activités



Préparation et rédaction



Quart au PC scientifique



Traitement des données SMF

TRAVAUX HYDROGRAPHIQUES AUX ÎLES KERGUELEN

(1996 - 2003)

Par Philippe Bourzeix, maître principal hydrographe,
Henri Dolou, ingénieur en chef des études et techniques de l'armement hydrographe et
Hervé Thomas, major hydrographe

Ce rapport rend compte de l'activité de détachements de la mission hydrographique de l'Atlantique (MHA) constitués pour conduire des levés hydrographiques aux îles Kerguelen à l'occasion de trois campagnes réparties entre 1996 et 2003.

Campagne « 1996-1997 » (décembre 1996 - février 1997) :

- chef de détachement : maître hydrographe Thierry Philippe ;
- adjoints : deux appelés ;
- la MHA était alors dirigée par l'ingénieur principal de l'armement Hélène Tonchia ;
- le RP n° 73 MHA/NP du 27 février 1998 rend compte dans le détail des travaux effectués.

Campagne « 2001-2002 » (octobre 2001 - février 2002) :

- chef de détachement : major hydrographe Hervé Thomas ;
- adjoint : maître hydrographe Fabrice Simon ;
- la MHA était alors dirigée par l'ingénieur en chef des études et techniques de l'armement Yves Guillam ;
- le RP n° 107 MHA/NP du 07 juin 2002 rend compte dans le détail des travaux effectués.

Campagne « 2003 » (janvier 2003 - avril 2003) :

- chef de détachement : major hydrographe Hervé Thomas ;
- adjoint : maître hydrographe Philippe Bourzeix ;
- la MHA était alors dirigée par l'ingénieur en chef des études et techniques de l'armement Henri Dolou ;
- le RP n° 137 MHA/NP du 10 juillet 2003 rend compte dans le détail des travaux effectués.

SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION	12-3
1.1	Des îles éloignées des routes traditionnelles	12-3
1.2	Un terrain d'études privilégié pour les scientifiques	12-3
1.3	Des îles peu connues à préserver	12-3
1.4	De l'IFRTP à l'IPEV	12-3
2.	TRAVAUX ANTÉRIEURS	12-4
3.	BESOINS À SATISFAIRE	12-4
3.1	Travaux prescrits dans les instructions techniques.....	12-4
4.	MOYENS	12-4
4.1	Matériel, conditionnement et transport	12-5
4.2	Moyens flottants	12-5
4.3	Autres moyens logistiques	12-7
5.	TRAVAUX RÉALISÉS	12-7
5.1	Géodésie	12-7
5.2	Localisation	12-7
5.3	Marée	12-8
5.4	Bathymétrie	12-9
	5.4.1 Acquisitions.....	12-9
	5.4.2 Traitements.....	12-9
5.5	Spatiopréparations	12-10
6.	TRAVAUX RESTANTS ET SUGGESTIONS	12-11
6.1	Travaux prescrits restants	12-11
6.2	Suggestions diverses :	12-11
	6.2.1 <i>La Curieuse</i>	12-11
	6.2.2 COMAR La Réunion	12-11
	6.2.3 Spatiopréparations	12-11
7.	CONCLUSIONS	12-11
	ANNEXE I : zones de levés	12-13
	ANNEXE II : travaux restants et suggestions	12-16
	ANNEXE III : illustrations photographiques	12-19

1. INTRODUCTION

1.1 Des îles éloignées des routes traditionnelles

Les îles Kerguelen se situent entre les 40^e rugissants et les 50^e hurlants à plus de 3 300 km d'une terre habitée. Elles furent découvertes en 1772 par Yves Joseph de Kerguelen de Trémarec qui débarqua l'année suivante dans la baie de l'Oiseau sur la côte Nord.



Les terres australes et antarctiques françaises

Depuis 1955, cet archipel, au même titre que l'île Amsterdam, l'île Saint-Paul, l'île Crozet et la Terre Adélie fait partie des Terres australes et antarctiques françaises (TAAF) constituant un des territoires d'outre-mer français. Les îles Eparses (Glorieuses, Juan de Nova, Europa et Bassas da India) dans le canal du Mozambique et Tromelin au nord de La Réunion sont aussi gérées par les TAAF depuis 2007.

1.2 Un terrain d'études privilégié pour les scientifiques

Ces îles perpétuellement balayées par le vent subantarctique, étaient jadis surnommées îles de la Désolation ; aucun arbre ne pouvait en effet y pousser. Depuis sa découverte, cela n'a néanmoins pas arrêté quelques aventuriers de fréquenter cet archipel - essentiellement des phoquières et des baleiniers - jusqu'au début du XX^e siècle.

Depuis 1950, ces îles sont devenues un terrain d'études pour les scientifiques. Pour parcourir les îles, les chercheurs se font fréquemment déposer sur leurs lieux de travail par voie maritime. Ces voies sont peu connues et peuvent même être dangereuses par manque de données bathymétriques entre les quelques trois cents îles et îlots qui constituent l'archipel.

En 2003, les principaux bâtiments à naviguer dans la zone étaient les suivants :

- le *Marion Dufresne* qui assure le ravitaillement des îles antarctiques ;
- *La Curieuse* qui dépose les chercheurs en différents points de l'archipel ;
- le chaland *L'Aventure* qui transporte des passagers (à deux ou quatre pattes) exclusivement dans les eaux du golfe du Morbihan ;
- des bateaux pêchant la légine ;
- la frégate de surveillance *Nivôse* et le patrouilleur austral *Albatros* de la marine nationale qui contrôlent la zone de pêche ;
- et au large quelques voiliers (course Vendée Globe, etc.) ;

Ces bâtiments devaient naviguer sur des cartes marines qui étaient malheureusement peu actualisées faute de levés hydrographiques.

S'écarter des routes pratiquées pouvait donc être très risqué. Bien qu'habitué de la baie du Morbihan, le *Marion Dufresne*, a ainsi cassé en 2002 une de ses pales d'hélice. *La Curieuse*, devant quant à elle s'aventurer un peu plus dans les fjords, était accoutumée à talonner.

1.3 Des îles peu connues à préserver

Il fut ainsi décidé de conduire des levés hydrographiques dans cet archipel et d'en améliorer les conditions de navigation ; un certain nombre de mouillages abrités, fiables et bien répartis devaient en particulier être définis.

Cette exigence était enfin renforcée du fait que le *Marion Dufresne* transportait depuis quelques années des touristes. Cet attrait touristique pour ces terres antarctiques et subantarctique conduit en effet à des besoins et des exigences nouveaux qui doivent maintenant être pris en compte d'autant plus que l'éloignement des terres habitées augmente les difficultés pour déployer des moyens de sauvetage ou faire face aux impacts de pollution de ces terres quasiment vierges. Le naufrage en 2007 du navire *Explorer* en Antarctique en rappelle l'importance.



Naufrage du navire *Explorer* en Antarctique

Le développement de la navigation dans des eaux jusque là rarement fréquentées est désormais une préoccupation importante de la commission hydrographique de l'OHI (Organisation hydrographique internationale) sur l'antarctique (CHA) ainsi que, mais dans une moindre mesure, par la commission hydrographique de l'Afrique et des îles australes qui intègre les îles Kerguelen (CHAIA).

1.4 De l'IFRTP à l'IPEV

Ce document fait référence à des textes antérieurs au 16 janvier 2002 date à partir de laquelle l'IFRTP (Institut français pour la recherche et la technologie polaires) est devenu l'IPEV (Institut polaire français Paul-Émile Victor). Le terme Institut polaire est employé par défaut dans ce document.

2. TRAVAUX ANTÉRIEURS

La précédente mission du SHOM datait de 1993. Un détachement opéra aux îles Kerguelen sous la direction de l'ingénieur principal des études et techniques de l'armement Pierre Mouscardès du 1^{er} octobre au 25 novembre 1993. Il s'agissait en fait de la troisième intervention d'un détachement récent du SHOM aux Kerguelen (les deux premières avaient eu lieu en 1991 et 1992 avec des moyens plus limités), depuis la signature en 1989 d'un protocole d'accord entre le SHOM et l'administration des TAAF (Cf. *Annales Hydrographiques n° 771* de 2002).

3. BESOINS À SATISFAIRE

Le principal objectif des trois missions menées par la MHA - réparties entre 1996 et 2003 - était clairement défini dans l'instruction technique n° 379 SHOM/EM/NP du 19 novembre 1996: « ... permettre à des navires de 7 mètres¹ de tirant d'eau de naviguer en sécurité dans les îles Kerguelen sur un certain nombre de routes, donnant accès à des mouillages sûrs ».

Les travaux prescrits lors de la mission de 1996-1997 s'inscrivaient dans la continuité des travaux de 1993 (voir le rapport particulier n° 170 MOM/NP du 02 août 1994). La priorité en 1993 était d'assurer la sécurité des bâtiments qui entraient dans la baie du Morbihan pour se rendre à Port-aux-Français ou à Port Jeanne d'Arc.

Lors des deux missions suivantes (2001-2002 et 2003) cette liste de travaux fut complétée (et étendue à l'extérieur du golfe du Morbihan) par des demandes formulées :

- lors de réunions techniques avec l'Institut polaire ;
- par courriers provenant des TAAF ;
- par la section géodésie géophysique de l'établissement principal du SHOM (EPSHOM) ;
- par le commandant de la marine (COMAR) à La Réunion.

D'autres demandes, cette fois-ci orales, des commandants du *Marion Dufresne*, du *Nivôse* et des capitaines de *La Curieuse*, furent aussi prises en compte lors de chaque mission.

Toutes ces demandes durent être constamment confrontées aux possibilités d'emploi de *La Curieuse* (porteur exploité pour les levés) et des aléas de la météorologie.

3.1 Travaux prescrits dans les instructions techniques

Campagne « 1996-1997 »

Lors de la campagne « 1996-1997 » la priorité fut donnée aux travaux suivants :

01. recherche de hauts-fonds à l'ouvert de la passe Royale ;
02. détermination d'un passage entre les roches Harston et Balfour ;
03. poursuite du levé de reconnaissance à l'ouvert de la baie du Morbihan ;
04. recherche d'un écho douteux à proximité de l'île d'Haynes ;
05. recherche d'une sonde douteuse (SD) de 11,9 m à l'ouest de la passe de l'Hydrographie ;

¹ Le tirant d'eau du *Marion Dufresne* est de 6,95 m.

06. levés des mouillages et leurs accès à Port Curieuse (6.1), en baie de l'Oiseau (6.2), en baie du Hopeful (6.3) et en baie de la Table (6.4).

(Voir 1^{ère} planche annexe I).

Campagne « 2001-2002 »

Les travaux prescrits lors de la campagne « 2001-2002 » furent adaptés suite aux travaux réalisés lors de la mission précédente :

01. achèvement de la recherche d'un haut-fond de 9 m à l'ouvert de la passe Royale ;
02. levés des mouillages et de leurs accès des baies de la Table et de la Mouche ;
03. levé d'un mouillage et de ses accès en baie de Douarnenez ;
04. reconnaissance d'un mouillage et de ses accès en baie de Douarnenez ;
05. levé d'un mouillage et de ses accès en baie de l'Oiseau ;
06. levé d'un mouillage et de ses accès en baie du Hopeful ;
07. haut-fond entre l'île du Cimetière et l'île Verte² ;
08. haut-fond entre l'île Guillou et les îlots Simone² ;
09. levé de reconnaissance entre l'île aux Cochons et l'île du Chat² ;
10. levé de reconnaissance et accès à l'anse du Radioleine² ;
11. levé de reconnaissance et accès au bras de la Fonderie².

(Cf. 2^e planche annexe I)

Campagne « 2003 »

L'instruction particulière 272 MHA/NP du 22 novembre 2002 précisa les priorités de la dernière mission de « 2003 » :

01. levé de mouillage et ses accès en baie de l'Oiseau ;
 02. levé de mouillage et ses accès en baie du Hopeful ;
 03. levé de reconnaissance aux îles Nuageuses ;
 04. levé de mouillage et ses accès à l'anse du Jardin ;
 05. accès à la pointe du Muséum ;
 06. levé du canal d'Aldrich pour accéder à la baie du Repulse ;
 07. levé de mouillage et ses accès en baie Phillips (Philippe sur CM 6741) pour accéder à l'île Foch ;
 08. levé de mouillage et ses accès à Port Dimanche (Port Sunday sur CM 6741) ;
 09. levé de mouillage et ses accès en baie de la Table (un 21 PA reste à vérifier et à repositionner) ;
 10. levé de mouillage et ses accès en baie de la Mouche (pour terminer le sondage jusqu'à l'isobathe 100 mètres) ;
 11. levé de mouillage et ses accès en baie Greenland ;
 12. levé de mouillage et ses accès à Port Curieuse ;
 13. levé de mouillage et ses accès en baie de Douarnenez.
- (Voir 3^e planche annexe I)

4. MOYENS

Un protocole d'accord (n° 385 SHOM/EM/NP du 22 novembre 1996) avait été signé entre les TAAF, l'Institut polaire et le SHOM afin de pouvoir bénéficier des moyens

² Travaux proposés par le commandant du *Marion Dufresne*.

locaux nécessaires pour mener à bien les travaux hydrographiques. Ce protocole fut reconduit en 2001 (n° 185 SHOM/EM/NP du 24 octobre 2001).



Port-aux-Français - salle de traitement dans la bibliothèque scientifique

L'Institut polaire mit à disposition du détachement des chambres individuelles à Port-aux-Français. Un local spécifique fut également proposé pour installer la chaîne de traitement. Le détachement put aussi s'appuyer sur la logistique de la base par l'intermédiaire de M Alain Lamalle, responsable des opérations subantarctiques de l'Institut polaire lors de ces trois missions. Il fut l'interlocuteur privilégié des trois détachements pour l'adaptation du programme d'activité et plus particulièrement le partage de l'emploi de *La Curieuse* avec les scientifiques de la base.



Port-aux-Français - bâtiment L VI

4.1 Matériel, conditionnement et transport

L'acheminement du matériel sur zone fut pris en charge par l'Institut polaire. Le temps d'acheminement des caisses en bois (de 4m³ lors des deux dernières missions) était de l'ordre de deux mois entre la dépose à l'Institut polaire à Brest et sa « livraison » à Port-aux-Français - les caisses furent transportées de Brest à La Réunion par cargo, pour être ensuite prises en charge par le *Marion Dufresne* (qui

déposât celles-ci lors de sa rotation dans les îles). Les délais furent identiques pour le retour. Lors de la deuxième mission une autre caisse fut acheminée par les soins du transit de la marine de Brest à La Réunion.

Un soin méticuleux devait être apporté au conditionnement de ces caisses. Tout matériel cassé lors du transport ne pouvait malheureusement pas être réparé (ou difficilement) sur place compromettant ainsi la mission. Un traceur présentant une avarie lors de sa réception à Port-aux-Français fut ainsi inutilisable, une solution fut trouvée par l'Institut polaire qui préleva un traceur sur le *Marion Dufresne*.

Le choix de doubler le matériel le plus sensible (voire même de le répartir dans deux caisses différentes) pouvait sembler rassurant. Les deux serveurs de la campagne 2003, ainsi conditionnés, ne résistèrent cependant pas aux transports. Il fut néanmoins possible de reconstituer un serveur opérationnel à partir des deux appareils endommagés.

4.2 Moyens flottants

La Curieuse



La Curieuse

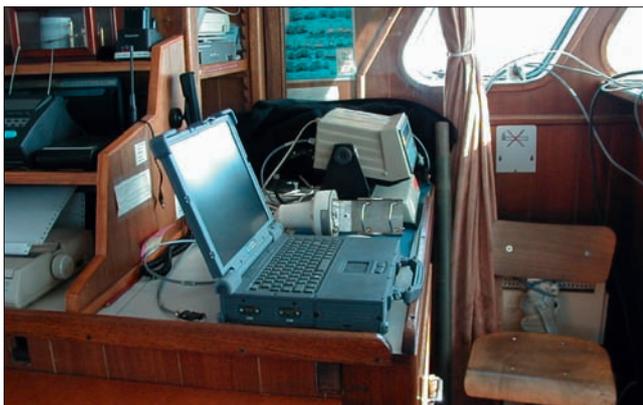
La Curieuse fut le porteur principal utilisé lors des trois missions. Il s'agit d'un bâtiment de 25 m de long et de 7,6 m de large avec un tirant d'eau de 3,0 m. Un sondeur monofaisceau DESO 20 était déjà installé à poste fixe en passerelle. Les autres équipements (système d'acquisition, système de positionnement, système de traitement³) furent mis en place en début de campagne pour n'être retirés que quelques jours avant le retour vers La Réunion.

Ce bâtiment n'était pas uniquement dédié à l'équipe du SHOM. *La Curieuse* était en effet également nécessaire aux déplacements d'une grande majorité des scientifiques. Le programme de principe du bâtiment devait donc être établi en tenant compte au mieux des besoins exprimés par les différentes parties lors de leur arrivée à Port-aux-Français.

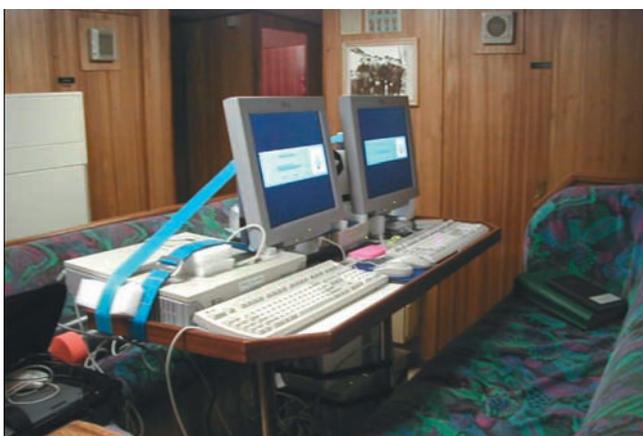
Ce programme était dans les faits constamment adapté en fonction des conditions météorologiques, des avaries de *La Curieuse*, etc. M Alain Lamalle, fit tout son possible pour respecter les termes du protocole en particulier celui qui stipulait que l'Institut polaire mettrait en œuvre le navire *La*

³ La chaîne de traitement fut installée dans le salon sous le pont principal.

Curieuse au moins deux semaines par mois au profit exclusif du détachement pendant la campagne de travaux.



Système d'acquisition en passerelle



Chaîne de traitement dans le salon

Le *Marion Dufresne*



Marion Dufresne

Ce bâtiment fut utilisé pour le transport des équipes et du matériel lors des trois missions entre l'île de La Réunion et les îles Kerguelen. D'une longueur de 120 m pour 20 m de large il était exploité plusieurs fois dans l'année pour ravitailler (au sens très large : nourriture, matériel de construction, gasoil, etc.) les îles antarctiques. Ces différentes îles n'ayant pas de port en eau profonde, le déchargement de sa cargaison s'effectuait soit par barges soit par l'hélicoptère qu'il embarquait lors de ce type de mission.



Débarquement sur une barge d'une grue à Port Alfred (île de la Possession - Crozet)

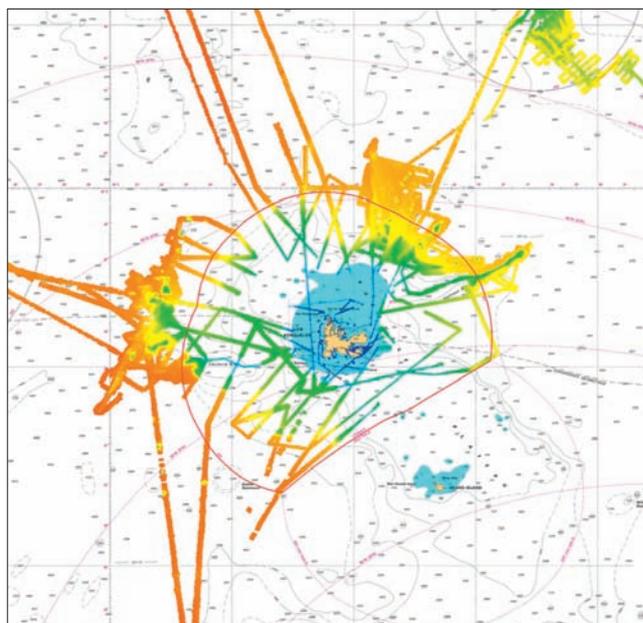
Nota :

1- Si pour les besoins spécifiques du SHOM l'emploi de l'hélicoptère s'avérait nécessaire (comme évoqué dans le rapport particulier de la campagne de 2003), il faudrait alors que le *Marion Dufresne* puisse faire une escale plus longue qu'à l'accoutumée.

Il faudrait en outre prévoir et planifier son emploi en avance. Ce moyen permettrait en particulier de reconnaître les sites présentant un intérêt pour l'implantation de repères géodésiques et de piliers « stationnables ».

L'hélicoptère fut employé lors de la campagne « 1996-1997 » pour contrôler les positions des roches Balfour et Harston.

2- Bien qu'indépendant des travaux objet de ce rapport, il est ici rappelé, que le *Marion Dufresne* a aussi été employé par le SHOM en d'autres occasions dans cette zone lors des campagnes KERGUEPLAC. Ces campagnes faisaient partie d'un programme plus vaste nommé EXTRAPLAC (extension raisonnée du plateau continental), programme national



Campagnes KERGUEPLAC aux abords des îles Kerguelen

financé par le Gouvernement français sous la coordination du secrétariat général de la mer (SGMer) et regroupant les compétences de l'Ifremer (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer), du SHOM, de l'IFP (Institut français du pétrole) et de l'IPEV. Les trois campagnes KERGUE-PLAC, réalisées entre 2004 et 2008, permirent en février 2009 de constituer puis de déposer auprès des Nations Unies une demande d'extension du plateau continental pour la zone Kerguelen.

4.3 Autres moyens logistiques

La station météorologique (armée par trois agents de Météo France) fournissait des bulletins (plus ou moins fiables au delà de 5 heures, le temps changeant très rapidement à ces latitudes) sur lesquels s'appuyaient toutes personnes travaillant à l'extérieur. Compte tenu du peu de jours sans vent, il était impératif, pour le SHOM, de profiter des périodes calmes pour réaliser rapidement des mesures de nivellement. La station météorologique fournit par ailleurs les pressions atmosphériques nécessaires au traitement de la marée.

Différents moyens de communication furent mis en place par l'Institut polaire au profit des équipes du SHOM. La station Inmarsat (miniM) amenée lors de la deuxième mission ne fonctionnant pas (pas de « spot beam » disponible pour la région), une liaison mail fut fournie par l'Institut polaire. Lors de la troisième mission, l'équipe profita également de cette même prestation. Un autre moyen de communication fut mis en place par l'Institut polaire (liaison Iridium en l'occurrence) entre une équipe à terre à Port-aux-Français et une autre au Nord de l'île lors de mesures GPS simultanées (deux récepteurs Ashtech LD XII, l'un à Port-aux-Français, l'autre dans la baie de l'Oiseau) pour l'implantation d'un repère géodésique en baie de l'Oiseau.

5. TRAVAUX RÉALISÉS

Campagne	1996 1997	2001 2002	2003
Durée totale de la mission (de Brest à Brest)	95 j	98 j	108 j
Durée de présence aux îles Kerguelen	75 j	61 j	85 j
Nombre de jours de travaux à la mer	31 j	27 j	42 j

5.1 Géodésie

Des problèmes matériels (récepteur fonctionnant de manière aléatoire) empêchèrent l'implantation d'un point géodésique dans la baie de l'Oiseau.

Dans ces régions très soumises aux vents, il est à noter que les piliers « stationnables » (par exemple le pilier NIVMER de Port-aux-Français qui fut utilisé) étaient particulièrement bien adaptés. L'antenne GPS peut en effet être directement vissée sur le pilier. Ce type de pilier serait à privilégier si des mesures géodésiques devaient être planifiées lors de prochaines campagnes.



Pilier "stationnable" NIVMER à Port-aux-Français

Le système WGS84 fut utilisé pour les travaux menés pendant ces trois campagnes. Les documents définitifs furent établis dans le même système en utilisant la projection de Mercator (latitude moyenne 49° 30' S).



Mesures GPS

5.2 Localisation

La mise en place d'une station d'émission DGPS dans l'archipel des Kerguelen (hormis le golfe du Morbihan) fut assez difficile pour plusieurs raisons.

- D'une part du fait que, les points de l'IGN (Institut géographique national) étaient situés dans leur grande majorité sur des sommets uniquement accessibles par hélicoptère. Comme mentionné précédemment un tel moyen de transport n'était présent que lors du passage du *Marion Dufresne* et qu'il était par ailleurs très sollicité pour d'autres opérations (Cf. §3.2 Le *Marion Dufresne*).
- D'autre part, parce que la mise en place d'une station accessible par la mer soulevait aussi d'autres problématiques : les conditions météorologiques (surtout le vent), l'entretien des batteries et l'éventualité de ne pas pouvoir



Hélicoptère sur le *Marion Dufresne*

récupérer le matériel en cas de très mauvaise mer, faisaient que le choix de son installation devait être mûrement réfléchi.

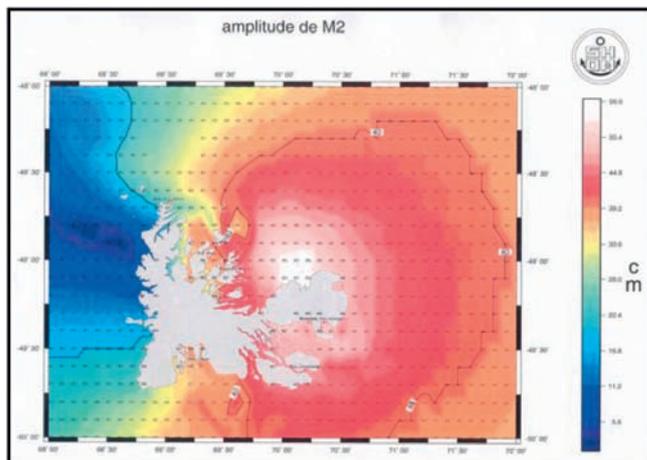


Installation d'une station d'émission DGPS sur le phare de l'île Murray lors de la campagne 2001-2002

Le premier détachement pu tout de même installer une station d'émission DGPS sur le feu de l'île Murray (à l'entrée du golfe du Morbihan) pour ses travaux (pour mémoire lors de la campagne en 1993, une station DGPS/UHF fut installée sur la presqu'île du Prince de Galles). Le deuxième détachement adopta la même solution mais uniquement pour achever la recherche d'un haut-fond de 9 m à l'ouvert de la passe Royale. Les autres travaux de cette mission furent, quant à eux, réalisés en GPS naturel. Le troisième détachement travailla uniquement en GPS naturel.

Le fait de travailler en GPS naturel lors des deux dernières missions ne posa pas de problème dans la mesure où les levés devaient être effectués à une échelle inférieure à 1/5 000. Si à l'avenir une échelle supérieure était exigée il faudrait à nouveau mettre en place un système de localisation plus fin et prendre en compte les problématiques exposées précédemment.

5.3 Marée



Marée complexe - amplitude de l'onde M2

La marée fut observée par des marégraphes (de type SUBER SLS 23 ou MORS OT 660) immergés à Port-aux-Français pendant toute la durée des trois campagnes. Les mesures furent judicieusement (dysfonctionnement courant d'un des appareils) doublées dans ce port principal qui servait de référence pour la détermination des zéros de réduction des sondes des autres observatoires.

Un contrôle des repères de nivellement fut conduit lors de chaque campagne. Aucun changement d'altitude ne fut observé à l'exception d'un repère (voir annexe C du rapport 137 MHA/NP du 10 juillet 2003). Etant donné le peu de jours sans vent et les fortes dénivelées, il était impératif de profiter des périodes d'accalmie pour réaliser rapidement les mesures de nivellement. Il serait maintenant intéressant, pour les futures missions d'utiliser un niveau électronique. Cela n'empêchera cependant pas, lors de long nivellement, de multiplier les repères intermédiaires. Le calage des hauteurs d'eau par rapport au zéro de réduction des sondes à Port-aux-Français fut fait par mesure de tirant d'air à partir :

- du repère « C »⁴ lors des campagnes 1996-1997 et 2001-2002 ;
- du repère « D » lors de la dernière mission.



Mise à l'eau d'un marégraphe en baie de l'Oiseau

⁴ Le repère « C » est solidaire d'une partie de l'échelle qui est démontée occasionnellement pour entretien, donc peu fiable. Cela explique le choix du repère « D » lors de la dernière mission.

Lors des trois campagnes, les pressions atmosphériques furent fournies par la station météorologique de Port-aux-Français. Aucune station autonome du type Mado ne fut emmenée.

Le zéro de réduction des sondes aux îles Kerguelen est situé à 3,070 m au dessous du repère fondamental « B » (origine AH 1951 page 104) : penny cimenté horizontalement dans le rocher à 10 m au sud-est de l'ancien marégraphe à Port-aux-Français.

Campagne « 1996-1997 »

La valeur de la densité de l'eau de mer fut fournie par le laboratoire de biologie marine de Port-aux-Français. Une fiche d'observatoire de marée fut rédigée pour ce port.

Campagne « 2001-2002 »

Lors de cette mission la valeur de la densité de l'eau fut déterminée à partir de prélèvements. Quatre fiches d'observatoires de marée furent rédigées :

- « Port-aux-Français » (49 jours) ;
- « Baie de la Table » (4 jours) ;
- « Baie de la Mouche » (5 jours) ;
- « Port-Couvreux » (4 jours).

Les périodes d'observation étant très courtes pour les trois derniers sites, le bureau marée de l'EPSHOM développa un mode opératoire spécifique décrit dans le rapport particulier n° 107 MHA/NP du 07 juin 2002 (§7.1.4).

Campagne « 2003 »

Lors de cette campagne, l'indisponibilité de plongeurs pour mettre en place des marégraphes (hors du golfe du Morbihan) incita à mettre l'accent sur des observations de longues durées afin de minimiser le nombre de manipulations. Les observatoires furent donc répartis judicieusement pour couvrir plusieurs levés.

Cinq fiches furent rédigées :

- « Port-aux-Français » (71 jours) ;
- « Baie de l'Oiseau » (35 jours) ;
- « Port Marie » (25 jours) ;
- « Baie Greenland » (29 jours) ;
- « Baie de la Mouche » (8 jours).

La valeur de la densité de l'eau de mer fut déterminée grâce aux données provenant d'un salinomètre LW197. Elle fut confirmée par des prélèvements.

Pour tous les levés, les sondes furent réduites de la marée calculée par le modèle numérique « masgdata.Kerguelen » du 3 juin 2003 calé par les mesures de marégraphes immergés à Port-aux-Français (les observations locales étant intégrées dans le modèle – voir rapport particulier 137 MHA/NP du 10 juillet 2003 §5.1.4).

5.4 Bathymétrie

5.4.1 Acquisitions

La bathymétrie fut fournie par des sondeurs monofaisceaux.

La présence importante d'algues géantes (*macrocystis*) limita particulièrement l'emploi du sondeur latéral dont on pouvait craindre la perte. Elle interdit par ailleurs l'utilisation de la base 210 KHz du DESO 20 de *La Curieuse* et gêna sensiblement la qualité de la numérisation de la base 33 KHz. Les interférences générées par l'autre sondeur de *La Curieuse* (qui utilisait deux fréquences différentes – le 28 KHz et le 50 KHz) dégradèrent également la qualité de la numérisation.

Les principaux systèmes d'acquisition de données furent les suivants :

Campagne	Système acquisition
1996-1997	AQIVED
2001-2002	AQIDOCNG V1.1.5
2003	AQIDOCNG V1.1.8

Ces systèmes assuraient non seulement le guidage du porteur mais également l'acquisition des données de localisation et de bathymétrie.

5.4.2 Traitements

Les principaux systèmes de traitement de données furent les suivants :

Campagne	Système de traitement
1996-1997	TRADOC V3.26
2001-2002	TRADOC V4.3
2003	TRADOC V4.3

Campagne « 1996-1997 »

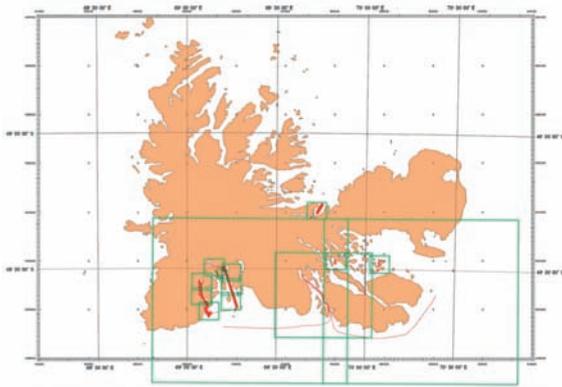
Les conditions météorologiques clémentes et une très bonne disponibilité de *La Curieuse* permirent au détachement de réaliser tous les travaux demandés, à l'exception des mouillages situés loin de la base :

- 1 minute de bathymétrie au 1/2 500 ;
- 2 minutes de bathymétrie au 1/10 000 ;
- 1 minute de bathymétrie au 1/40 000 ;
- 3 minutes de bathymétrie au 1/100 000 ;
- 2 minute de recherche au 1/10 000 ;
- 1 minute complémentaire de recherche au 1/10 000.

Campagne « 2001-2002 »

Les contraintes de calendrier de *La Curieuse* et les conditions météorologiques (beaucoup moins bonnes que lors de la précédente campagne), permirent de conduire les tâches de priorités 1 et 2 ainsi que la totalité des demandes du commandant du *Marion Dufresne* :

- 10 minutes de bathymétrie au 1/10 000 ;
- 1 minute de bathymétrie au 1/50 000 ;
- 2 minutes de bathymétrie au 1/100 000 ;
- 1 minute de recherche au 1/5 000.



Minutes de bathymétrie réalisées lors de la campagne « 2001-2002 »

Campagne 2003

Les zones à sonder étaient très peu ou n'avaient jamais été hydrographiées.

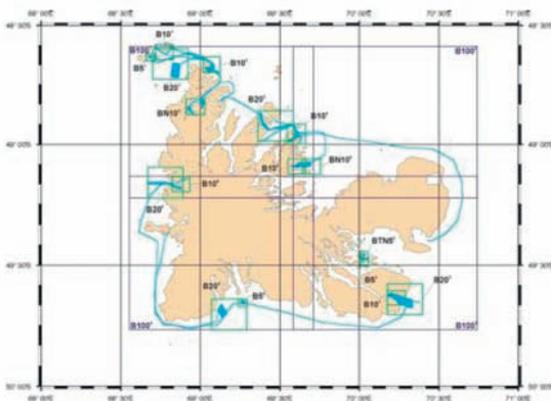
Un mode opératoire simple fut adopté en liaison avec le capitaine de *La Curieuse* pour ces types de levé.

Dans un premier temps, le capitaine naviguait selon une route libre délimitant les zones qu'il estimait dangereuses (la présence de *macrocystis* était un bon indicateur). Le réseau de profils de sondages était ensuite tracé à l'intérieur des zones ainsi délimitées.

Ce dispositif devait limiter les risques sachant qu'en cas de grosses avaries le déploiement de secours (venant de Port-aux-Français par voie terrestre - le chaland *L'Aventure*, autre bâtiment déployé sur la zone, ne pouvant naviguer que dans le golfe du Morbihan) serait très difficile à mettre en place.

Le détachement effectua la totalité des tâches de priorité 1, 2 et 3 définies dans l'instruction particulière hormis le levé de la baie Phillips (Philippe sur CM 6741). L'accès à l'île Foch étant interdit, son sondage n'était plus d'actualité. Parmi les travaux de priorité 4, seul le levé de la baie de l'African fut réalisé :

- 4 minutes de bathymétrie au 1/5 000 ;
- 8 minutes de bathymétrie au 1/10 000 ;
- 5 minutes de bathymétrie au 1/20 000 ;
- 4 minutes de bathymétrie au 1/100 000 ;
- 1 minute de recherche au 1/5 000.



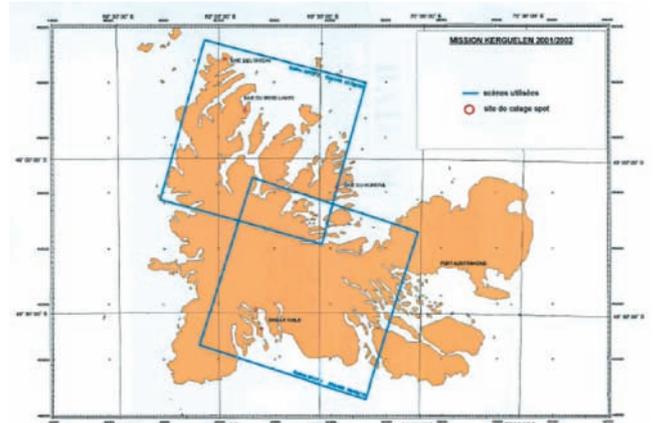
Minutes bathymétriques réalisées lors de la campagne « 2003 »

5.5 Spatiopréparations

Les travaux de spatiopréparation SPOT ne furent réalisés que lors des deux dernières campagnes.

Campagne « 2001-2002 »

Six trajectographies (en mode statique rapide à l'aide d'un GPS en mode naturel) furent réalisées pour caler deux scènes SPOT fournies par le bureau traitement d'image (BTI) : n° 51 du 08/09/1991 et n° 39 du 19/03/1986.

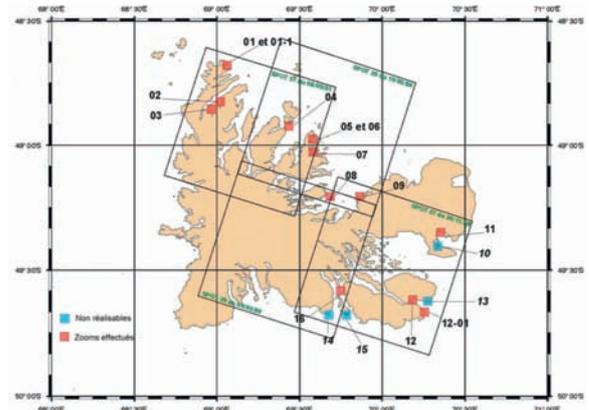


Scènes SPOT de la campagne 2001-2002

Numéro	Zone
01 et 02	Baie de la Table
03	Baie de l'Oiseau
04 et 05	Baie du Brise-lames
06	Baie du Hopeful

Campagne « 2003 »

Quatre scènes SPOT étaient disponibles. En plus de celles exploitées lors de la mission précédente, la scène n° 27 du 26/11/1988 fut utilisée lors de cette dernière mission. Ces trois scènes furent couvertes par quatorze trajectographies (même procédure adoptée que lors de la mission précédente). La scène située dans la partie sud-ouest ne fut pas exploitée.



Scènes SPOT de la campagne de 2003

Numéro	Zone
01 et 01-1	Baie de l'Oiseau
02 et 03	Baie de Recques
04	Canal d'Aldrich
05, 06 et 07	Presqu'île Joffre
08	Bras de la Fonderie
09	Port Elisabeth
10	Baie Norvégienne
12, 12-1 et 13	Baie Greenland
14, 15 et 16	Baie des Swains

6. TRAVAUX RESTANTS ET SUGGESTIONS

6.1 Travaux prescrits restants

Le rapport particulier n° 137 MHA/NP du 10 juillet 2003 dresse le bilan de ces trois campagnes. Pour tenir compte des besoins exprimés à cette époque il faudrait lors de prochains détachements :

- effectuer le levé d'un mouillage et des accès au détroit du port de la Marianne (demandé dans l'instruction technique de 1996) ;
- effectuer des compléments dans la baie de l'African (travaux initiaux effectués en 2003) ;
- achever le levé du chenal J.B. Charcot (travaux initiaux effectués en 2003) ;
- achever le levé de la passe de l'Alouette (travaux initiaux effectués en 2003).

Les zones correspondantes sont présentées en annexe II : « Travaux prescrits restants ».

6.2 Suggestions diverses :

Ce même rapport donne aussi quelques suggestions dont il faudra le moment venu vérifier l'actualité.

6.2.1 La Curieuse

Le capitaine de *La Curieuse* a ainsi, en 2003, proposé d'investiguer le passage de La Gazelle, afin de déterminer une route donnant accès à Port Dimanche (Port Sunday sur CM 6741) et à la baie des Astronomes. Ce levé pourrait inclure la zone de danger autour de la roche Australe. Il suggérerait également qu'un levé soit effectué dans le détroit de Tucker où le patrouilleur *Albatros* s'était « posé » sur un rocher il y a quelques années.

Les sondages de la baie Larose, de la baie Chimay et de leurs accès, joints aux levés de la baie de la Mouche et de la baie de la Table réalisés pendant la campagne 2001-2002 complèteraient enfin en grande partie la zone sud des îles Kerguelen.

Les zones correspondantes sont présentées en annexe II « Suggestion de *La Curieuse* ».

6.2.2 COMAR La Réunion

Le commandant de la marine à La Réunion a, quant à lui, proposé en 2003 les travaux suivants :

- compléments dans la baie de Hillsborough ;
- baie de Rhodes ;
- baie Blanche et baie du Centre ;
- îles Leygues ;
- quelques compléments dans la baie du Morbihan.

Les zones correspondantes sont présentées en annexe II : « suggestion du COMAR La Réunion ».

6.2.3 Spatiopréparations

Il faudrait enfin poursuivre les spatiopréparations des parties de l'île non couvertes par les scènes SPOT « spatiopréparées » pendant les campagnes 2001-2002 et 2003.

7. CONCLUSIONS

Même si ces récents déploiements ont sensiblement amélioré la connaissance hydrographique de certaines zones de navigation, il reste encore de nombreux besoins à satisfaire.

De nouvelles zones de levés ont été définies plus haut. Les travaux bathymétriques devront par ailleurs être accompagnés de mesures permettant d'une part d'améliorer la localisation à la mer et d'autre part la marée.

Lors d'une prochaine campagne, il semble nécessaire de mettre l'accent sur la géodésie, le nivellement et la marée.

Concernant la localisation, les seuls points disponibles sur la côte étant des points IGN situés dans leur grande majorité sur des sommets accessibles uniquement par hélicoptère, il serait nécessaire d'implanter plusieurs points le long de la côte, qui serviraient à l'installation de stations DGPS.

Ces mêmes points permettraient de rattacher des repères de nivellement d'observatoires de marée évitant de recourir à chaque mission à des calages de marégraphe par concordance.

Concernant la marée, des observations complémentaires (augmentation de la durée, nouvelles zones de mesures) permettront d'améliorer les constantes harmoniques actuelles et les modèles de marée. Le tableau ci-dessous apporte un bilan sur les mesures déjà effectuées.

Observatoire	Nombre de jours
Port-aux-Français	282 j en 1962-1963
	44 j en 1991
	34 j en 1993
	45 j en 1996-1997
	49 j en 2001-2002
	71 j en 2003
Baie Larose	93 j en 1992
Baie du Hopeful	52 j en 1991
Baie de la Table	4 j en 2001-2002
Baie de la Mouche	5 j en 2001-2002
	8 j en 2003
Port-Couvreux	4 j en 2001-2002
Baie de l'Oiseau	35 j en 2003
Port Marie	25 j en 2003
Baie Greenland	29 j en 2003

En terme de rentabilité, le nombre de jours de travaux à la mer rapporté au temps de présence aux îles mériterait d'être amélioré. Cette présence effective à la mer était principalement « contractualisée » par protocole entre le SHOM, l'IPEV et les TAAF : il y était en effet stipulé que l'Institut polaire mettrait en œuvre le navire *La Curieuse* au moins deux semaines par mois au profit exclusif du détachement pendant la campagne de travaux.

La priorité sur zone étant donnée aux acquisitions et non aux traitements, le temps de présence à la mer (météo permettant) pourrait être augmenté sous réserve de pouvoir bénéficier d'un autre moyen flottant.

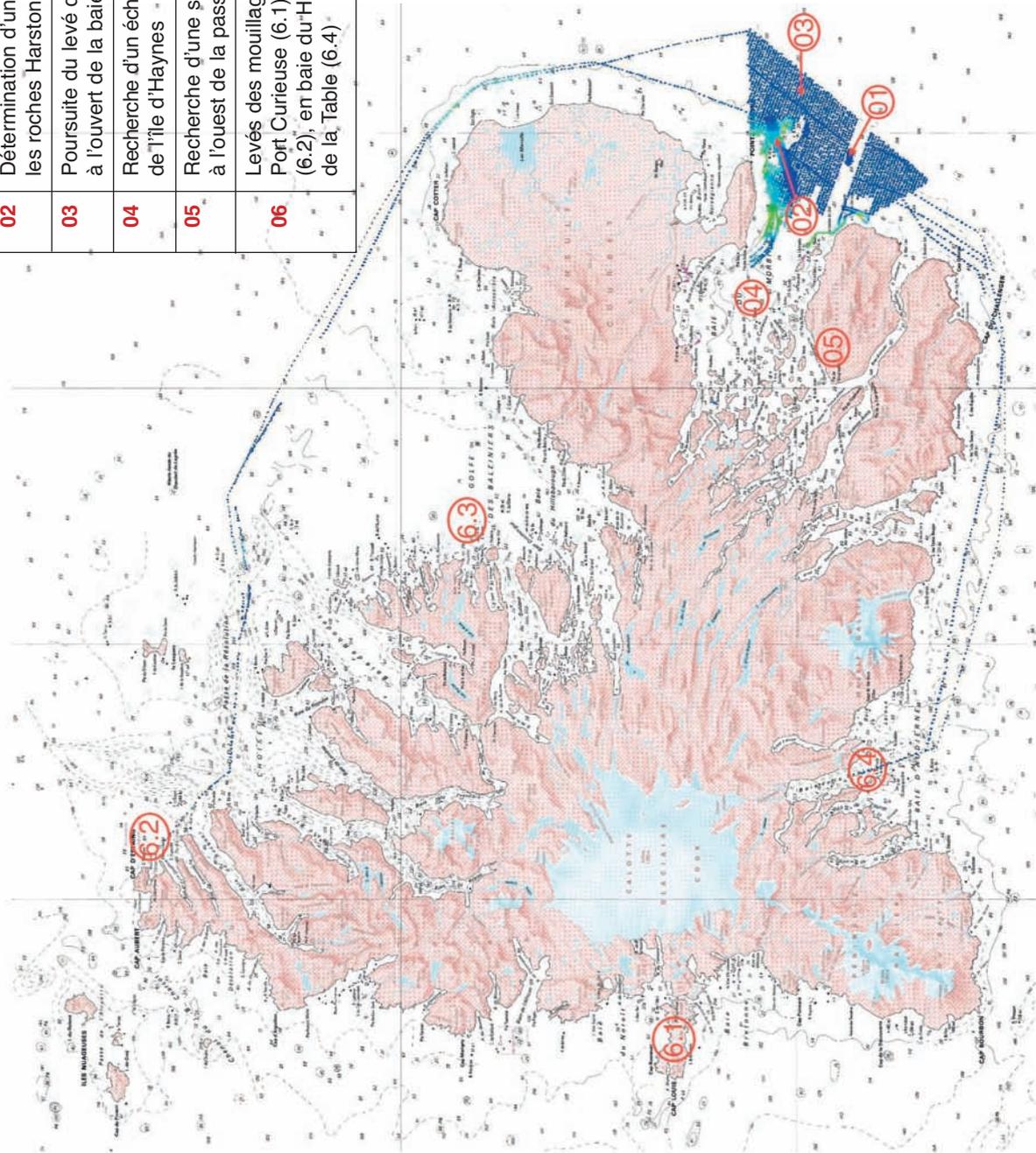
Pour les travaux dans la zone « protégée » du golfe du Morbihan l'emploi d'une vedette hydrographique (idéalement équipée d'un sondeur multifaisceau, par défaut équipée d'un sondeur monofaisceau du système déployable des groupes hydro-océanographiques du SHOM) transportée sur place par le *Marion Dufresne* serait bien entendu du plus grand intérêt.

ANNEXE I : zones de levés

Campagne « 1996-1997 »

(N° en rouge : zones de travaux prévus, parties en bleu : zones sondées)

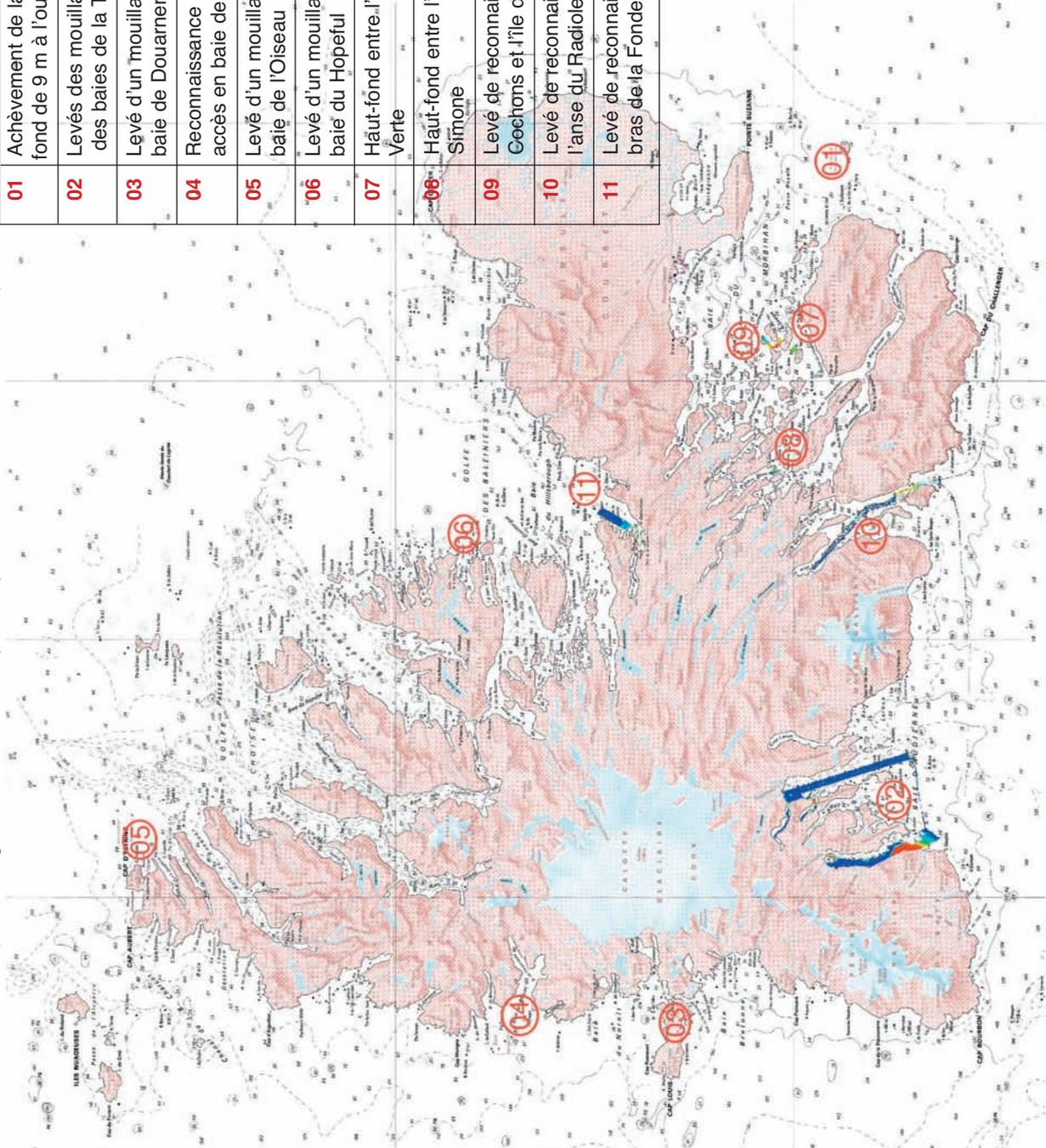
Travaux prescrits	
01	Recherche de hauts-fonds à l'ouvert de la Passe Royale
02	Détermination d'un passage entre les roches Harston et Balfour
03	Poursuite du levé de reconnaissance à l'ouvert de la baie du Morbihan
04	Recherche d'un écho d'outoux à proximité de l'île d'Haynes
05	Recherche d'une sonde 11,9 m SD à l'ouest de la passe de l'Hydrographie
06	Levés des mouillages et leurs accès à Port Curieuse (6.1), en baie de l'Oiseau (6.2), en baie du Hopetul (6.3) et en baie de la Table (6.4)



Campagne « 2001-2002 »

(N° en rouge : zones de travaux prévus, parties en bleu : zones sondées)

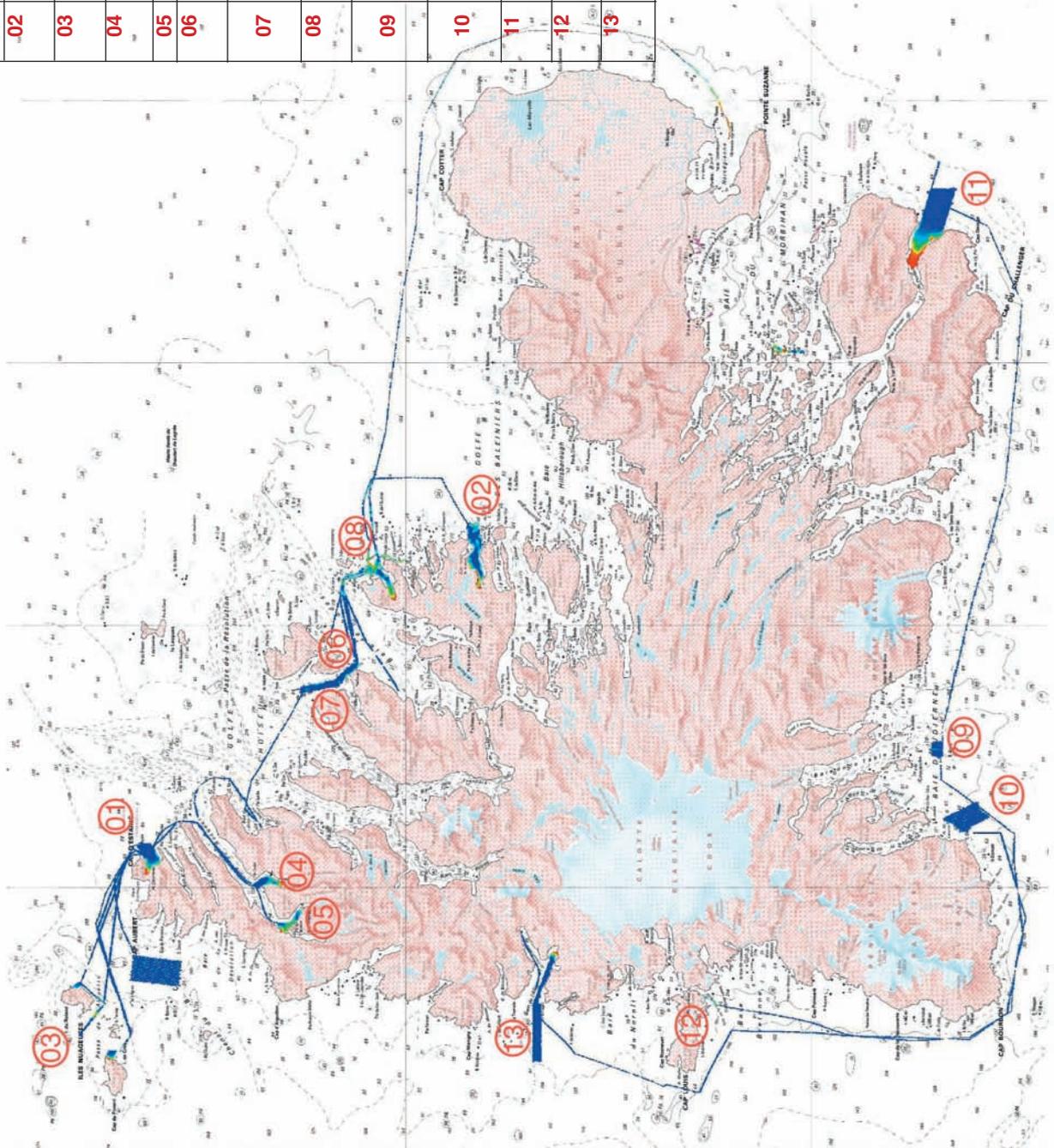
Travaux prescrits	
01	Achèvement de la recherche d'un haut-fond de 9 m à l'ouvert de la passe Royale
02	Levés des mouillages et de leurs accès des baies de la Table et de la Mouche
03	Levé d'un mouillage et de ses accès en baie de Douarnenez
04	Reconnaissance d'un mouillage et de ses accès en baie de Douarnenez
05	Levé d'un mouillage et de ses accès en baie de l'Oiseau
06	Levé d'un mouillage et de ses accès en baie du Hopetul
07	Haut-fond entre l'île du Cimetière et l'île Verte
08	Haut-fond entre l'île Guillou et les îlots Simone
09	Levé de reconnaissance entre l'île aux Cochons et l'île du Chat
10	Levé de reconnaissance et accès à l'anse du Radioleine
11	Levé de reconnaissance et accès au bras de la Fonderie



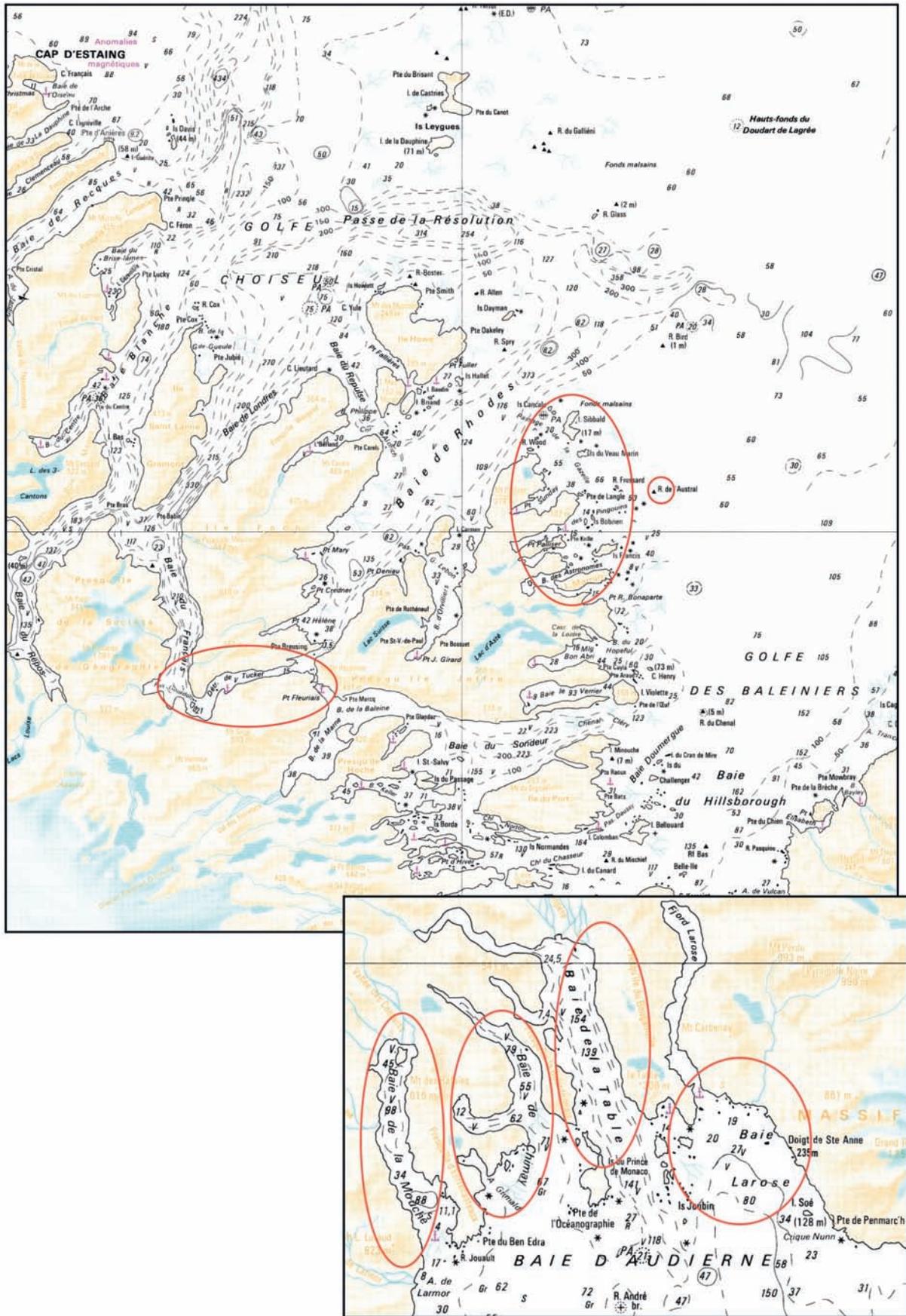
Campagne « 2003 »

(N° en rouge : zones de travaux prévus, parties en bleu : zones sondées)

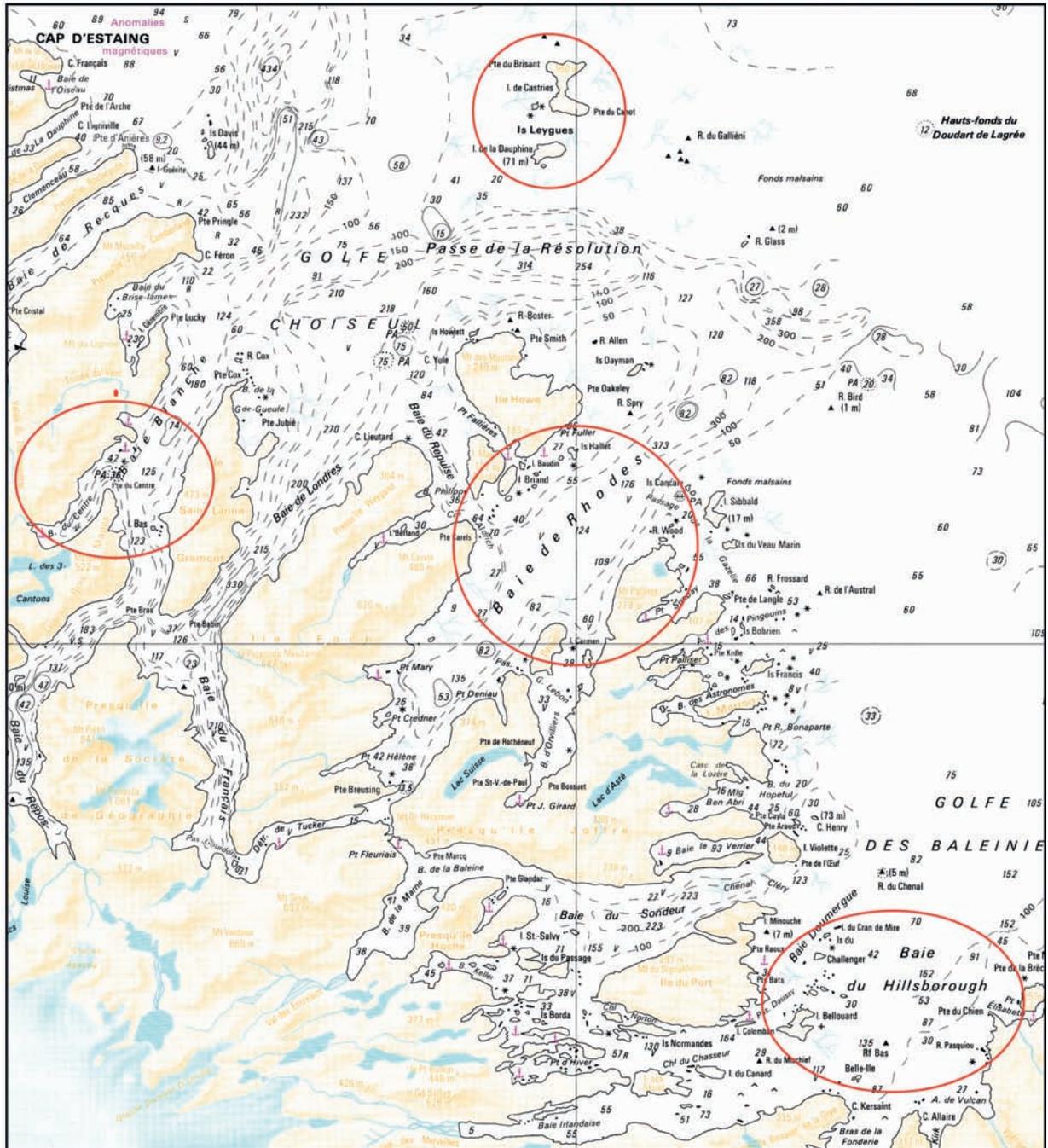
Travaux prescrits	
01	Levé de mouillage et ses accès en baie de l'Oiseau
02	Levé de mouillage et ses accès en baie du Hopetul
03	Levé de reconnaissance aux îles Nuageuses
04	Levé de mouillage et ses accès à l'anse du Jardin
05	Accès à la pointe du Muséum
06	Levé du canal d'Aldrich pour accéder à la baie du Repulse
07	Levé de mouillage et ses accès en baie Phillips (Philippe sur CM 6741) pour accéder à l'île Foch
08	Levé de mouillage et ses accès à Port Sunday (Port Dimanche IN L9)
09	Levé de mouillage et ses accès en baie de la Table (un 21 PA reste à vérifier et à repositionner)
10	Levé de mouillage et ses accès en baie de la Mouche (pour terminer le sondage jusqu'à l'isobathe 100 mètres)
11	Levé de mouillage et ses accès en baie Greenland
12	Levé de mouillage et ses accès à Port Curieuse
13	Levé de mouillage et ses accès en baie de Douarnenez



Suggestions de La Curieuse



Suggestions du COMAR La Réunion



ANNEXE III : illustrations photographiques
Le détachement de la campagne « 1996-1997 »



Vue aérienne de Port-aux-Français

Le détachement de la campagne « 2001-2002 »



Port Alfred (île de la Possession - Crozet)



Port Alfred (île de la Possession - Crozet)

Le détachement de la campagne « 2003 »



L'anse de l'Excursion



L'anse de l'Excursion

Baie Larose
(photos échangées avec les scientifiques lors de la campagne 2003)



Baie de l'Oiseau – Port Christmas



GROUPE OCÉANOGRAPHIQUE DU PACIFIQUE

(7 Août 2006 – 7 août 2008)

par Denis Créach, ingénieur principal de l'armement, directeur du GOP

SOMMAIRE

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE	13-3
1.1 Introduction	13-3
1.2 Cadre général	13-3
1.3 Physionomie de l'activité	13-3
1.4 Points marquants	13-4
2. TRAVAUX RÉALISÉS	13-4
2.1 En Nouvelle-Calédonie	13-4
2.1.1 Travaux d'hydrographie générale aux abords de Nouméa	13-4
2.1.2 Travaux d'hydrographie aux abords des îles Belep	13-5
2.1.3 Travaux hydrographiques aux abords du port de Prony (Goro Nickel) (S200700400)	13-5
2.1.4 Travaux hydrographiques aux îles Loyautés	13-5
2.1.5 Travaux à Port Boisé (S200603000)	13-6
2.1.6 Travaux au site n° 5 du Mont-Dore (S200605900)	13-6
2.2 A Wallis et Futuna	13-6
2.2.1 Travaux hydrographiques à Wallis (S200608800)	13-6
2.2.2 Travaux de spatiopréparation à Futuna (S200703400)	13-6
2.2.3 Levé de plageage à Futuna (S200606300)	13-6
2.3 En Polynésie française	13-6
2.3.1 Travaux de spatiopréparation aux Tuamotu	13-6
2.3.2 Travaux de plageage	13-7
2.3.3 Travaux en baie d'Opunohu (S200800500)	13-7
2.4 Divers	13-7
2.4.1 Travaux hydrographiques à Vanikoro (S200805100)	13-7
2.4.2 Travaux à Clipperton	13-7
2.4.3 Travaux de détection de mines	13-7
2.4.4 Travaux de détection d'obstructions à Hao	13-7
2.4.5 Mesures de courant au point fixe en ZRN de Papeete (S200702200)	13-7
2.4.6 Reconnaissance d'une passe à l'est du Grand Lagon (Nouvelle-Calédonie)	13-7
2.4.7 Travaux d'expertise pour l'implantation et le maintien des réseaux marégraphiques	13-8
2.4.8 Contribution à l'acquisition et à la diffusion de l'information nautique	13-8
3. ORGANISATION, MOYENS	13-8
3.1 Organisation	13-8
3.2 Personnel	13-9
3.3 Locaux	13-9
3.4 Véhicules	13-9
3.5 Moyens flottants	13-9
3.5.1 Navires	13-9
3.5.2 Embarcations	13-10
3.6 Matériel	13-10
3.6.1 Localisation	13-10
3.6.2 Informatique	13-11
3.6.3 Bathymétrie	13-11
3.7 Logiciels	13-11

4. MÉTHODES	13-11
4.1 Organisation et fonctionnement	13-11
4.2 Qualité	13-12
4.2.1 Acquisition	13-12
4.2.2 Traitement des données	13-12
4.2.3 Documentation	13-12
4.2.4 MCO (maintien en condition opérationnelle)	13-12
5. TRAVAUX SOUS CONVENTION	13-12
6. LES PARTENARIATS ÉTAT/PAYS	13-13
6.1 En Nouvelle-Calédonie	13-13
6.2 En Polynésie française	13-13
7. COMMUNICATION	13-14
8. BILAN	13-14
8.1 Nature des travaux à mener dans le Pacifique	13-14
8.2 Organisation et fonctionnement	13-14
8.2.1 En Nouvelle-Calédonie	13-14
8.2.2 En Polynésie française	13-15
9. PROPOSITION : RECENTRAGE EN NOUVELLE-CALÉDONIE DÈS 2009	13-15
9.1 Plan d'armement	13-15
9.2 Plan d'équipement	13-15
9.3 Fonctionnement : est-il concevable de tout gérer de Nouvelle-Calédonie avec efficacité et efficience ?	13-16
9.4 Un recentrage en 2009 ?	13-16
9.5 Conclusion	13-16
ANNEXE I : Référence des rapports particuliers	13-18
ANNEXE II : Localisation des zones de travaux	13-19
ENCART PHOTOGRAPHIQUE I : Travaux hydrographiques	13-20
ENCART PHOTOGRAPHIQUE II : Faits marquants	13-22

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE

1.1 Introduction

Ce rapport couvre l'activité de la mission puis du groupe océanographique du Pacifique (MOP - GOP) durant la période du 7 août 2006 au 7 août 2008 en Nouvelle-Calédonie, à Wallis et Futuna, en Polynésie française et à Clipperton.

Au-delà des seuls travaux à la mer ou sur le terrain, il présente tous les travaux réalisés par le GOP pendant cette période, y compris le traitement des travaux antérieurs qui n'avaient pas été achevés par les directeurs techniques précédents, les travaux menés pendant la période qui n'ont pu être finalisés avant le 7 août 2008, et enfin la préparation des travaux dont les opérations à la mer ou sur le terrain n'avaient pas commencé le 7 août 2008.

1.2 Cadre général

Les missions du GOP sont concentrées sur l'amélioration de la connaissance hydrographique en Nouvelle-Calédonie, à Wallis et Futuna et en Polynésie française contribuant à la fois aux missions du SHOM de service hydrographique national, de soutien en environnement marin pour la défense et de soutien aux politiques publiques maritimes.

Depuis le départ des BH2 *Laplace* et *Arago* en 1999 et 2002, le GOP ne dispose plus de moyen hauturier en propre ou mis à disposition, limitant son rayon d'action à des travaux côtiers et littoraux. Pourtant la géographie de son espace de responsabilité implique que ces travaux sont souvent dans des endroits éloignés (dépendances de la Nouvelle-Calédonie, Wallis et Futuna, les différents archipels de Polynésie française) dont l'accès ne peut se faire que par voie maritime ou aérienne nécessitant un concours systématique civil ou militaire. Ils sont par ailleurs susceptibles, pour les travaux d'hydrographie militaire ou d'action de l'État en mer (AEM), de devoir être réactifs.

Dans le domaine de l'hydrographie générale (HG), son activité s'inscrit dans une démarche de partenariat volontariste avec la Nouvelle-Calédonie et la Polynésie française. Celle-ci prend en compte la compétence de la Polynésie française en matière de sécurité de la circulation maritime dans ses eaux intérieures depuis l'édition de sa loi organique (LO) de 1996 (art 27.11°) et les travaux en cours en matière de transfert dans le même domaine qui devrait vraisemblablement être effectif d'ici 2010 en Nouvelle-Calédonie. Néanmoins le fonctionnement de ces partenariats est asymétrique. En Nouvelle-Calédonie il est réel et actif, l'ensemble des activités qui y sont menées le prouve et bien que la situation ne pourra pas se stabiliser avant l'achèvement du processus de transfert, la situation paraît saine. En Polynésie française il en est tout autrement puisque la logique de partenariat portée par le service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM) depuis huit ans environ est réduite à un concours apporté à la Polynésie française pour lui permettre de se doter d'une capacité hydrographique opérationnelle. L'activité du GOP au titre de l'hydrographie générale est donc désormais quasi inexistante en Polynésie française : bien qu'étendue sur près de 5 millions de km², la quasi totalité des eaux sous responsabilité de l'État est abyssale et se

trouve donc hors du domaine de capacité du GOP. Cela est d'autant plus vrai que la Polynésie française a décidé en juillet 2008 de contractualiser à une société privée les levés à conduire dans sa zone de responsabilité en lui apportant ses moyens.

Dans le domaine de l'hydro-océanographie militaire (HOM) au profit de la défense, les travaux traditionnels conduits par le GOP sont des levés de plageage. Néanmoins la forte réduction annoncée du format du régiment d'infanterie de marine du Pacifique (RIMAP) en Polynésie française et les incertitudes persistantes sur la future opération d'armement remplaçant les bâtiments de transport léger (BATRAL) tendent à réduire les besoins qui étaient par ailleurs faibles. Il reste potentiellement des actions ponctuelles programmées à moyenne ou courte échéance.

Dans le domaine du soutien aux politiques publiques maritimes (PPM), le GOP a contribué activement à l'expertise marégraphique apportée aux services de l'État (sécurité civile de Nouvelle-Calédonie et de Polynésie française) pour la mise en place et l'entretien d'un réseau marégraphique au profit de la surveillance des tsunamis et des phénomènes météorologiques majeurs. Ces travaux devraient prendre de l'ampleur avec une maîtrise d'œuvre envisagée du SHOM pour le réseau en Nouvelle-Calédonie et les états limitrophes. Ce point est en cours de traitement au moment de la rédaction de ce rapport (août 2008). Par ailleurs le SHOM peut et doit pouvoir apporter son concours de façon inopinée au profit de l'action de l'AEM: la recherche de la boîte noire du Twin Otter assurant la liaison Moorea/Papeete qui s'est abîmé en mer en août 2007 est un bon exemple. Ces travaux sont par nature imprévisibles et peuvent demander une certaine réactivité.

Enfin, du point de vue des moyens, le GOP est actuellement bien doté en moyens scientifiques et informatiques dans ses deux échelons. Néanmoins un regroupement de ceux-ci améliorerait leur disponibilité par une redondance trop souvent manquante dans chaque échelon.

1.3 Physionomie de l'activité

Les axes d'efforts principaux du GOP pendant la période considérée par ce rapport ont été la conduite de levés, mais aussi la rédaction des levés pour atteindre l'objectif d'âge des levés assigné et enfin la contribution à la mise en place et la consolidation des capacités hydrographiques en partenariat avec la Nouvelle-Calédonie et la Polynésie française.

Sur la fin de période ont débuté des travaux d'expertise pour le déploiement et le maintien de réseaux marégraphiques permanents en Polynésie puis en Nouvelle-Calédonie, à Wallis et à Futuna.

Les principaux travaux ont été :

- levés bathymétriques de voies recommandées aux abords de Nouméa ;
- levés bathymétriques à Ouvéa ;
- levés bathymétriques aux Belep ;
- levé bathymétrique à Moorea ;
- expertise pour la définition et l'implantation de réseaux marégraphiques permanents en Polynésie française.

1.4 Points marquants

Les points marquants pendant cette période ont été :

- la situation préoccupante de l'indicateur d'âge des levés en 2006 (2,52 ans) qui s'est rétablie à hauteur des objectifs en 2008 (0,85 an) ;
- le concours au BEA mer apporté pour la recherche de la boîte noire du Twin Otter qui s'est abîmé en mer le 9 août 2007 entre Moorea et Tahiti ;
- la tenue à Tahiti du 18 au 21 septembre 2007 de la 8^e commission hydrographique régionale du Pacifique sud-ouest (CHRPPO) ;
- l'inspection générale du GOP en Nouvelle-Calédonie et en Polynésie française par le directeur général du SHOM, l'IGA Gilles Bessero, en septembre 2007 ;
- la rédaction partagée entre les échelons calédoniens et polynésiens d'un levé exécuté en Polynésie française ;
- la mise en place d'actions méthodologiques qui ont permis d'améliorer la conduite des levés, de consolider le processus de vérification métrologique, de mieux garantir la capitalisation et donc la pérennité du savoir-faire mais aussi d'assurer la standardisation des tâches et des résultats et ainsi améliorer l'efficacité de l'exécution des travaux ;
- la création du groupe océanographique du Pacifique (GOP) en remplacement de la mission océanographique du Pacifique (MOP) en 2007. Ce changement, qui s'est opéré dans la continuité, a fait suite à la création de l'établissement public administratif (EPA) SHOM ;
- un rotary de 100 % des personnels des deux services hydrographie du GOP en 2007 et de 75 % de son service logistique ;
- l'affectation du premier technicien hydrographe calédonien formé à l'école des hydrographes du SHOM et mis à disposition du SHOM au GOP le 1^{er} août 2007. Un second est attendu depuis le 1^{er} août 2008.

2. TRAVAUX RÉALISÉS

Les levés réalisés entre 2006 et 2008 ont systématiquement fait l'objet de rapports : ces travaux ne sont donc présentés ici que de manière synthétique ; la référence des rapports est indiquée et rappelée en annexe I. L'annexe II rappelle géographiquement leur localisation.

2.1 En Nouvelle-Calédonie

2.1.1 Travaux d'hydrographie générale aux abords de Nouméa

Les travaux hydrographiques à mener aux abords de Nouméa pour la définition ou la modification de voies recommandées ont été définis à partir de l'analyse des demandes du service de pilotage afin de régulariser sur les documents nautiques les pratiques locales en matière de voies de navigation pour les navires nécessitant un service de pilotage.

Levé des voies recommandées boîtes 2, 3 et 4 (S200608700)

Ce levé a été conduit de 2002 à 2006, des recherches finales permettant de qualifier définitivement le levé ont été conduites en décembre 2006.

Levé de la voie recommandée de l'îlot Porc-épic à l'île Ouen (S200702400)

L'augmentation du trafic aux abords du canal de Woodin a conduit le service de pilotage à modifier ses routes. Les travaux à mener devaient permettre de vérifier la pertinence de la modification de la voie recommandée. Le levé a été mené à l'aide du baliseur polyvalent *Louis Hénin* en 2005. Une voie recommandée avec seuil de navigation à 17 m a été proposée. Elle est orientée au 113°/293° sur l'alignement du pylône RFO par le feu de l'îlot Porc-épic, entre le prolongement de la route au 101°/281° au nord et la route des deux feux au 088° au sud. Elle est large de 500 m de part et d'autre de l'axe. Cette voie recommandée annule et remplace celle passant par le feu du sémaphore de Nouméa par le feu de l'îlot Porc-épic au 297,5°.

Levé de modification de la voie recommandée de la passe de Uitoe à Nouméa

Ce levé doit permettre de s'appuyer sur l'antenne du Montravel qui est un amer remarquable alors que la voie d'accès recommandée actuellement a été définie au XIX^e siècle. Il a été programmé par boîte en 2007 et 2008 à l'aide du baliseur polyvalent *Eugène Mornat* des phares et balises et de la vedette hydrographique *Chambeyron*. Ce levé non prioritaire a été utilisé comme variable d'ajustement de l'activité en Nouvelle-Calédonie. Sa rédaction n'a pas été achevée pendant la période considérée par ce rapport.

Travaux hydrographiques en baie des Dames (S200602900)

La société Mobil de Nouvelle-Calédonie a saisi la commission hydrographique en février 2004 suivant la procédure d'urgence pour la réalisation d'un levé bathymétrique en baie des Dames, dans une zone de responsabilité du port autonome de Nouméa. Cette demande faisait suite à un incident survenu avec un pétrolier.

Suite à l'importance des travaux du point de vue de l'approvisionnement en carburant de l'île et de la sécurité de la navigation, la demande a été approuvée par le commandant de la marine (COMAR) et le secrétariat général de Nouvelle-Calédonie ainsi que la MOP. Ces travaux ont été conduits de mars 2004 à juillet 2007 à l'aide de la vedette *Chambeyron*. Cette durée anormalement longue s'explique par le très grand nombre d'obstructions dans cette baie, vestiges de la seconde guerre mondiale.

Travaux hydrographiques en base navale de Nouméa (S20060850000)

Les travaux hydrographiques menés ont été demandés par la base navale de Nouméa afin de préparer l'étude d'extension ou de construction d'un nouveau quai et de réactualiser la bathymétrie dans la zone d'approche des bâtiments.

Ces travaux ont été conduits d'août 2003 à juillet 2007 à l'aide de la coralline et de la vedette *Chambeyron*.

Travaux de topographie à Nouméa (S200800900)

Afin de mettre à jour la carte marine 7643 de Nouméa de travaux modifiant significativement la topographie de son littoral, le GOP a conduit des travaux topographiques les 14 et 15 février 2007. Ils concernent le quai des Scientifiques, la marina et les travaux de comblement en baie de l'Orphelinat, la cale près du quai de la Capricieuse, la topographie de ce

quai qui a été rénové, l'agrandissement du quai de Pêche, les travaux de comblement en cours pointe Adrien, l'apponnement pétrolier entre la baie des Dames et la baie de Numbo.

Par ailleurs une revue de balisage a été conduite dans la base navale et aux abords des cales de Nouville.

2.1.2 Travaux d'hydrographie aux abords des îles Belep

Travaux hydrographiques de la passe du d'Estrées à l'île Art (S200702500)

Les travaux hydrographiques menés aux îles Belep étaient destinés à permettre l'accès à la zone de mouillage en baie d'Aue (île Art) à partir de la passe du d'Estrées. Cette voie était susceptible de constituer par ailleurs la partie ouest d'une éventuelle voie d'accès est/ouest du Grand Lagon Nord via les îles Belep (entre Art et Pott).

Ces travaux contribuent à l'acquisition de la connaissance hydrographique dans le Grand Lagon Nord, encore très réduite. Ces travaux ont été conduits de mars à mai 2006 à l'aide du *Louis Hénin* et de la vedette *Chambeyron*.

Travaux de plage de Aue (Art) (S200705700)

En préparation de l'exercice « Croix du Sud » qui devait se tenir en partie aux îles Belep avec plageage et simulation d'évacuation de ressortissants, le GOP a conduit le levé de la plage d'Aue (île Art) du 20 au 24 août 2007 à l'aide de la coralline et le support du patrouilleur de la marine (P400) *La Moqueuse*.

Travaux hydrographiques de la baie de Uala à la baie de Aue (Art) (S200712300)

Les travaux étaient destinés à permettre la navigation entre les deux baies à l'occasion de l'exercice multinational interarmées « Croix du Sud » 2008. Par ailleurs ils complétaient les levés de 1981 et 2006 entre la baie de Uala et la baie d'Aue ainsi que le levé S200705700 décrit supra. Ils ont été conduits en novembre 2007 à l'aide du *Louis Hénin* en profitant de sa présence dans le nord de la Grande Terre et avec le concours de la vedette de la gendarmerie *Dumbéa* qui a assuré le transport des personnels.

La zone est saine sur une largeur de plus de 700 m sans anomalie significative.

2.1.3 Travaux hydrographiques aux abords du port de Prony (Goro Nickel) (S200700400)

Les travaux hydrographiques menés aux abords du port de Prony (Goro Nickel) ont été demandés lors de la commission hydrographique de février 2006 par le service de pilotage afin d'assurer au mieux les opérations d'accostage sur les deux quais nouvellement construits. Ils avaient pour objectif de contrôler la bathymétrie aux abords des quais et de vérifier les profondeurs dans les zones draguées pour faciliter l'accueil des bâtiments prévus à court et moyen terme : ce port est le plus grand port industriel de Nouvelle-Calédonie à ce jour et accueillera des navires de grands tirant d'eau et des navires transportant des marchandises dangereuses. Ces travaux ont été conduits en novembre 2006 à l'aide de la vedette *Chambeyron*.

2.1.4 Travaux hydrographiques aux îles Loyauté

Travaux hydrographiques à Ouvéa (S200707100)

Les travaux hydrographiques menés à Ouvéa du 6 au 17 novembre 2006 à l'aide du *Louis Hénin* et de la vedette *Chambeyron* étaient destinés au soutien à la politique de développement économique de la Province des îles Loyauté (levé de reconnaissance en prévision de l'implantation de cales, recherche de zones vierges de toute vie, notamment corallienne, dans un rayon de 500 m au minimum pour l'implantation de dispositifs de concentration de poissons lago-naires). Ils répondaient également à une demande de la marine nationale de voir améliorer l'hydrographie de l'atoll de Beautemps-Beaupré afin de définir un mouillage plus sûr.

Travaux hydrographiques à Ouvéa (S200707200 et S200805200)

Les travaux hydrographiques menés à Ouvéa en 2007 et 2008 ont été conduits afin de déterminer une voie d'accès hydrographiée des Pléiades du Nord au wharf de Hwaadrila afin d'assurer la navigation des bâtiments transportant des passagers et du fret en conformité au code ISM (international safety management). Ces caboteurs pratiquent régulièrement les passes du Taureau et de la Baleine bien qu'elles étaient jusqu'à présent non hydrographiées et non balisées. Ces levés contribuent très directement à la continuité territoriale de l'île. Ils ont été conduits par le GOP à l'aide du *Louis Hénin* et de la vedette *Chambeyron*, du 9 au 17 avril 2007 puis du 9 au 18 octobre 2007 (levé S200707200) et enfin du 16 au 26 juin 2008 (levé S200805200).

Une voie d'accès hydrographiée de la passe du Taureau au wharf de Hwaadrila a été privilégiée au vu des abords de cette passe et en regard de ceux de la passe de la Baleine. Cette voie doit contourner un plateau corallien qui se situe très précisément sur l'axe le plus direct de la passe au wharf. Des seuils de navigation de 7,5 m puis de 6,4 m en se rapprochant du wharf ont été proposés pour prendre en compte la navigation des caboteurs et l'évolution possible de leur tirant d'eau mais aussi l'éventualité de voir des petits paquebots emprunter désormais la passe du Taureau.

La voie par la Baleine n'est raisonnablement envisageable que pour une navigation locale et des caboteurs réguliers. Son seuil de navigation proposé est de 4,8 m.

Travaux hydrographiques à Tiga (S200707300)

Dans le cadre du contrat cadre État/Pays, une réflexion est en cours sur la capacité à voir accoster des caboteurs au wharf de Tiga pour l'approvisionnement de l'île. Un autre axe d'étude était la capacité pour les paquebots de la P&O de mouiller à Tiga (longueur 250 m, rayon d'évitage 0,25 M, mouillage par moins de 30 m, 9 m de tirant d'eau). Des travaux hydrographiques ont donc été menés en complément des travaux conduits par l'institut de recherche et de développement (IRD) pour la partie nord de l'île, seule zone potentiellement éligible au mouillage des paquebots au vu des conditions de mer et de vent et de la bathymétrie.

Le levé de reconnaissance conduit du 11 au 19 avril 2007 par le GOP à l'aide de la vedette *Chambeyron* ne permet pas d'identifier une zone compatible avec les contraintes de mouillage de paquebots. L'accès au petit lagon (zone nord)

n'est quant à lui accessible qu'aux petites embarcations des pratiques locales qui peuvent traverser le platier. La construction d'une infrastructure d'apportage de navires nécessiterait par ailleurs une longueur supérieure à 900 m ce qui paraît peu réaliste. L'ouverture du petit lagon, au-delà des aspects coutumiers, nécessiterait des travaux colossaux à la mesure de la taille du platier qui ne sont pas non plus envisageables. Enfin les travaux conduits aux abords immédiats du wharf de Tiga n'ont fait que confirmer que la zone d'évolution et de manœuvre disponible pour les caboteurs est très réduite et délicate. Pour permettre l'accostage de navires de taille supérieure à 20 m en toute sécurité, un déroctage devrait être prévu. Par ailleurs l'allongement du wharf ne paraît pas pertinent du fait de la sensibilité de la zone au vent : la situation actuelle serait encore dégradée.

2.1.5 Travaux à Port Boisé (S200603000)

La MOP a conduit un levé bathymétrique avant travaux de réfection du site du wharf de Port Boisé en mai 2005 à la demande de la Province Sud. Une société privée a conduit les travaux de réfection et de travaux hydrographiques de contrôle après dragage. Le résultat de ces travaux a été transmis au SHOM.

2.1.6 Travaux au site n° 5 du Mont-Dore (S200605900)

Dans le cadre de l'étude de l'aménagement d'un site pour l'accostage d'embarcations de faible tirant d'eau, la MOP a conduit un levé du 23 août au 21 septembre 2005 à l'aide de la vedette *Chambeyron*.

2.2 A Wallis et Futuna

2.2.1 Travaux hydrographiques à Wallis (S200608800)

Les travaux hydrographiques menés en baie de Mata Utu du 8 au 15 juillet 2006 à l'aide de la vedette *Chambeyron* étaient destinés à compléter les travaux de la MOP conduits en 1996-1997 et en 1999. Ils ont été demandés par les travaux publics (TP) de Wallis et Futuna afin d'élargir, en l'ouvrant au nord-est, la voie recommandée proposée par l'ICA Tonchia pour accéder au wharf de Mata Utu. La MOP a reçu le concours du BATRAL *Jacques Cartier* pour le transport du matériel (drome, véhicule, matériel scientifique) et des personnels.

Au-delà des résultats du levé qui ne permettent pas d'améliorer les conditions de navigation, la mise à jour de la cartographie (CM 6876) est apparue primordiale et l'implantation d'un balisage adapté par les TP de Wallis et Futuna semble nécessaire. Les instructions nautiques (IN) doivent par ailleurs encourager à emprunter la voie recommandée définie par l'ICA Tonchia, en la décrivant.

Par ailleurs, suite à l'analyse des documents antérieurs, deux avis urgents aux navigateurs (AVURNAV) concernant des sondes d'un levé de 1996 aux abords immédiats du port pétrolier de Halalo ont été diffusés en juillet 2008 : considérant les tirants d'eau des bâtiments et leur volonté de modifier la voie d'accès balisée pour arrondir leur route de présentation sur le terminal, ces sondes mettaient en cause directement la sécurité de la navigation.

2.2.2 Travaux de spatiopréparation à Futuna (S200703400)

Un levé de spatiopréparation a été conduit par la MOP du 29 juin au 7 juillet 2006. Il s'est fait à l'occasion du déploiement de la MOP à Futuna (voir levé de plage à Futuna).

2.2.3 Levé de plageage à Futuna (S200606300)

Un nouveau site de plageage dans l'anse de Sigave (Leava) a été reconnu d'un point de vue hydrographique par la MOP entre le 29 juin et le 7 juillet 2006 à la demande du COMAR de la Nouvelle-Calédonie. La MOP a reçu le concours du *Jacques Cartier* pour le transport du matériel (drome, véhicule, matériel scientifique) et des personnels. Le levé a été entravé pendant plusieurs jours par le refus coutumier d'accès à la cale de mise à l'eau de la vedette *Chambeyron*.

2.3 En Polynésie française

La très grande partie de ces travaux concerne la rédaction de levés conduits avant 2006. Les seuls levés conduits entre 2006 et 2008 sont un levé de la baie d'Oponuhu à Moorea en 2007 et un levé de plageage à Nuku-Hiva pour aider à la préparation de l'exercice « Patuki07 ». Un levé de détection d'obstructions à Hao dans le cadre de la dépollution des sites du centre d'expérimentation du Pacifique (CEP) a été programmé puis déprogrammé deux fois en juin 2008. Il devrait avoir lieu en août 2008. Ces deux derniers levés ont été programmés de façon très réactive avec des préavis inférieurs à 2 mois.

2.3.1 Travaux de spatiopréparation aux Tuamotu

De nombreux travaux de spatiopréparation exécutés avant 2006 ont été rédigés pendant la période considérée par ce rapport.

Spatio-préparation à Haraiki et Hiti (S200606900)

En vue de finaliser le dossier de définition des lignes de base en Polynésie française, la MOP a réalisé des travaux de spatiopréparation dans les atolls d'Haraiki et Hiti les 23 et 24 juin 2004. Ces travaux ont été réalisés avec le concours d'un hélicoptère Super Puma de l'escadron de transport outremer (ETOM) 82 qui a permis les transports inter îles et la plupart des transports au sein des atolls.

Les transects bathymétriques demandés à Haraiki n'ont pas été conduits.

Stéropréparation à Amanu (S200607000)

En vue de réaliser un cartouche sur la carte marine 5878 de la passe de Fafameru et de la darse du village d'Hikitake, la MOP a positionné des points de calage sur les photos aériennes utilisées à cet effet. Ces travaux ont été conduits les 21 et 22 juin 2004 avec le concours d'un hélicoptère Super Puma de l'ETOM 82.

Spatio et stéropréparation à Tikeau (S200703200)

Les travaux géodésiques de spatiopréparation ont été conduits le 11 avril 2003 et le complément bathymétrique ainsi que des travaux de stéropréparation ont été exécutés du 23 mars au 3 avril 2004.

Spatiopréparation à Tahanea (S200608200)

Les travaux bathymétriques et géodésiques ont été exécutés du 27 septembre au 6 octobre 2004 à l'aide de la vedette hydrographique *Hunter* et du concours du *Dumont d'Urville*.

Spatiopréparation à Katiu, Raraka et Motu Tunga (S200609100)

Les travaux bathymétriques pour le calage radio métrique de l'imagerie satellitale ont été conduits du 24 mai au 8 juin 2005 dans les atolls de Katiu, Raraka et Motu Tunga à l'aide de la vedette *Hunter*, de la coralline *Mareva* et du concours du BATRAL *Dumont d'Urville* pour le transport.

2.3.2 Travaux de plageage

Levé de plage à Rapa (S200608100)

La MOP a réalisé le levé du quai et de la rampe de Temotui à Rapa, à l'aide de la coralline *Mareva* du 6 au 8 février 2004 avec le concours du *Dumont d'Urville*. La partie longeant le quai n'a pu être hydrographiée du fait de la présence du BATRAL.

Depuis l'exécution du levé, le quai a été reconstruit partiellement pour offrir une face continue.

Levé de plage à Raivavae (S200606500) et travaux d'accès (S200705000)

De façon opportuniste, lors du déploiement de la MOP aux Australes, un levé du quai de Raivavae a été conduit le 4 février 2004 à l'aide de la coralline *Mareva* avec le concours du *Dumont d'Urville*.

Levé de plage à Nuku-Hiva (S200707700)

Les travaux de levé de plage conduits par le GOP du 14 au 17 mai 2007 à l'aide de la coralline *Mareva* devaient permettre de définir, d'un point de vue hydrographique, au moins un site de plage possible à Nuku-Hiva, en préparation de l'exercice « Patuki » 2007: des levés de plage à Taiohae, Hatiheu et Haahopu ont pu être conduits.

2.3.3 Travaux en baie d'Opunohu (S200800500)

Les travaux hydrographiques ont été conduits du 7 février au 16 avril 2007 et le 3 juillet 2008 pour mieux définir la passe de Tareu à la demande des pilotes au profit de l'accès des paquebots. Une très large extension de la zone a par ailleurs été conduite à l'intérieure de la baie ne montrant pas d'incohérence avec la connaissance antérieure datant de 1966 à 1972. Ils ont été conduits à l'aide de la vedette *Hunter* et la coralline *Mareva*.

2.4 Divers

2.4.1 Travaux hydrographiques à Vanikoro (S200805100)

Dans le cadre de la mission « La Pérouse 2008 » et afin de sécuriser les travaux du P400 *La Glorieuse* et du BATRAL *Dumont d'Urville*, des travaux hydrographiques sur Vanikoro ont été conduits pour acquérir la connaissance hydrographique suffisante de la passe du Bruat au mouillage de Paeu. Ils ont été conduits du 28 avril au 16 mai 2008 à l'aide de la coralline et avec le support du P400 *La Glorieuse*.

2.4.2 Travaux à Clipperton

En 2006 et au premier semestre 2007 le Haut-commissaire et le COMAR de Polynésie française étaient préoccupés par l'animation d'une présence française à Clipperton. Le GOP a conduit un levé marégraphique en mouillant consécutivement à 6 mois d'intervalle deux marégraphes sur Clipperton avec le concours actif de la frégate de surveillance (FS) *Prairial*. La situation politique ayant changé entre temps – désormais tout pêcheur mexicain le demandant obtient une licence de pêche dans les eaux de Clipperton – la FS n'est pas retournée sur zone depuis mars 2007 ; le second marégraphe y est toujours présent. Il est prévu d'être relevé par le *Prairial* au second semestre 2008 lors de sa mission de surveillance dans ces eaux.

2.4.3 Travaux de détection de mines

Sur une voie d'accès à Nouméa

Des travaux ont été conduits le 15 et 16 mai 2008 à la demande du commandant supérieur (COMSUP) mer Nouvelle-Calédonie profitant de la présence d'un détachement du groupe de plongeurs démineurs (GPD) sur Nouméa de retour de la mission précurseur à Vanikoro. Ils ont été programmés la veille de l'exécution. Ils ont permis de détecter des obstructions qui ont été analysées par le GPD. Aucun rapport n'a été rédigé, les informations ont été exploitées immédiatement par le GPD.

« Lagoon minex »

Un exercice international de traitement de mines est organisé par le COMSUP Nouvelle-Calédonie en novembre 2009 (Lagoon minex). Une investigation préalable au sonar latéral est requise pour positionner correctement les échos susceptibles de présenter un intérêt. Ces échos seront ensuite analysés par les experts du domaine. Deux zones sont concernées en priorité, l'une à la sortie du canal Woodin et l'autre aux abords de la voie recommandée d'accès à Nouméa, en continuité des travaux menés en mai 2008.

2.4.4 Travaux de détection d'obstructions à Hao

A la demande du COMSUP Polynésie française du 21 mai 2008, dans le cadre des travaux de dépollution des sites du CEP, le GOP a préparé un levé de détection de superstructures immergées dans l'atoll de Hao qu'il devait conduire en juin avec la vedette du COMSUP mer comme porteur d'opportunité. Ces travaux ont été repoussés en août.

2.4.5 Mesures de courant au point fixe en ZRN de Papeete (S200702200)

Afin de répondre à la demande de la direction des travaux de Papeete qui étudiait le remplacement de la passerelle d'accès au dock flottant, situé en zone de réparations navales (ZRN) au port de Papeete, la MOP a réalisé des mesures de courant du 20 septembre au 24 octobre 2006.

2.4.6 Reconnaissance d'une passe à l'est du Grand Lagon (Nouvelle-Calédonie)

A la demande de la Nouvelle-Calédonie, le GOP a effectué une reconnaissance aérienne sur la barrière est, au large

des Belep, afin de vérifier l'intérêt de mener un levé de reconnaissance bathymétrique dans cette zone pour déterminer une voie de navigation d'est en ouest du Grand Lagon Nord au profit des paquebots leur permettant ainsi de rejoindre Poum à Hienghène dans la nuit. Les résultats confirmant l'impossibilité de naviguer dans la passe d'Ongombua, seule passe ouverte de la zone, aucun levé d'hydrographie n'a été envisagé. Les travaux de la passe du d'Estrées à l'île Art ne seront donc pas prolongés.

2.4.7 Travaux d'expertise pour l'implantation et le maintien des réseaux marégraphiques

Le SHOM a apporté son concours en terme d'expertise pour la sélection de matériel et pour la définition de l'implantation des observatoires marégraphiques permanents en Polynésie française. Ce concours est au profit du service de la sécurité civile du Haussariat et de l'université de Polynésie française. Le GOP a contribué très activement à ce concours en analysant les offres de matériels, en apportant des éléments de spécification et en recettant le matériel de marégraphie. Il va poursuivre ce concours en créant les observatoires.

En Nouvelle-Calédonie, le SHOM a proposé officiellement son soutien pour la mise en place d'un système d'alerte aux tsunamis sur la composante marégraphique. Le GOP a contribué à définir le coût de ce soutien dans la durée et devra contribuer activement à la mise en place de ce réseau selon des modalités qui doivent être précisées avant la fin de l'année 2008.

2.4.8 Contribution à l'acquisition et à la diffusion de l'information nautique

Le GOP a contribué à la mise à jour des IN K10 et K11 avec le regret de ne pas avoir pu critiquer ou faire critiquer localement leur version au stade de la RG, en particulier pour des zones comme Nouméa ou Papeete.

Par ailleurs les commissions hydrographiques sont l'occasion de rappeler que l'information nautique est l'affaire de tous et en particulier de ceux qui donnent des autorisations d'emprise sur l'espace public maritime.

La sensibilisation à ce domaine devrait être plus active mais passe souvent après les activités de production liées à la conduite des levés.

3. ORGANISATION, MOYENS

L'organisation interne et les moyens du GOP ont profondément évolué entre 2006 et 2008 :

- abandon par la Polynésie française de la logique mixte de la cellule hydrographie de Polynésie française (CHPF) au profit d'une structure polynésienne ;
- mise en place d'une organisation interne distinguant la dimension organique dédiée à la préparation et au maintien au meilleur niveau des moyens, de la dimension opérationnelle vouée à l'exécution, la rédaction et la validation des levés ;
- affirmation de la nécessité de polyvalence pour le personnel ;

- affirmation de la logique d'unicité du GOP bien que réparti sur deux échelons à Nouméa et à Papeete ;
- initialisation d'une liste de porteurs d'opportunités sur place devant apporter plus de réactivité afin de pallier aux manques de moyens nautiques en Polynésie française et à Wallis et Futuna et considérant la difficulté d'acheminer nos propres porteurs par moyen militaire ;
- acquisition d'une vedette calédonienne littorale mise à disposition du GOP à temps plein ;
- affectation de deux techniciens hydrographes calédoniens formés à l'école des hydrographes du SHOM à Brest ;
- attribution de nouveaux matériels en géodésie, en informatique et sonal mettant le GOP à un bon niveau matériel ;
- mise en place d'une logique de capitalisation au sein du GOP dans les domaines de la préparation, de l'exécution et de la rédaction des levés.

3.1 Organisation

Le GOP, organiquement rattaché au directeur général du SHOM, est réparti sur deux implantations permanentes, l'une à Nouméa, l'autre à Papeete. Ces deux implantations possèdent chacune un plan d'armement et un code unité propre. Il s'agit de la base hydrographique de Nouvelle-Calédonie (BHNC), basée à Nouméa (code unité 19404) et de la base hydrographique de Polynésie française (BHPF) basée à Papeete (code unité 19403). Ces bases ont été conservées pour faciliter l'affectation administrative des personnels mais leur sens a été précisé : il s'agit d'unité exclusivement administrative.

Le GOP dispose de trois services organiques, relevant directement de l'autorité du directeur : le service logistique (SLOG), en charge de la préparation des moyens nécessaires à l'exécution des levés et à la vie courante de l'ensemble du GOP et les services hydrographie de Nouvelle-Calédonie (SHNC) et de Polynésie française (SHPF), en charge de la préparation de l'information (documentation, données) et du personnel hydrographe nécessaire à la bonne exécution, rédaction et validation des levés en Nouvelle-Calédonie et à Wallis et Futuna d'une part, en Polynésie française d'autre part.

Le GOP dispose d'une chaîne opérationnelle par échelon. Cette chaîne opérationnelle s'appuie sur les moyens mis à sa disposition par les services organiques : SLOG, SHNC, SHPF. Ces chaînes permettent de conduire (préparer, exécuter, rédiger, contrôler, valider) les levés hydrographiques conformément au programme du GOP. La fonction d'adjoint opération hydrographique, représentant du directeur technique, a été créée dans chaque échelon afin de clarifier les rôles au sein du GOP. Ils coordonnent et vérifient la qualité des travaux d'exécution et de rédaction.

Le GOP bénéficie par ailleurs du soutien administratif des bases navales de Nouméa et Papeete en matière de gestion du matériel et des personnels marine en particulier. Avant la création du SHOM en EPA ce soutien était formalisé par des protocoles de délégation d'autorité organique du directeur du SHOM au profit des COMAR NC et PF. La création de l'EPA SHOM et la disparition des COMAR ont rendu ces protocoles caducs en attendant une déclinaison locale de la convention de soutien du SHOM par le ministère de la défense (MINDEF) à venir.

3.2 Personnel

L'effectif théorique du GOP au 1^{er} août 2008 est donné dans le tableau suivant, en distinguant leur affectation physique :

	BHNC	BHPF
Officiers	1 ingénieur directeur de groupe (DDG)	1 ingénieur chef du service logistique (CSL)
Officiers marinières	7 (dont 4 hydrographes)*	4 (dont 2 hydrographes)*
Equipage	0	1
Total	8	7
		15

*le poste d'adjoint logistique a été déplacé de Papeete à Nouméa en juillet 2008

Cet effectif est complété de personnels territoriaux de Nouvelle-Calédonie : 1 (secrétaire) sur l'ensemble de période, 1 (hydrographe) affecté au 1^{er} août 2007 et 1 (hydrographe) attendu au 1^{er} août 2008.

Cet effectif est faible en Polynésie française mais adapté aux missions à réaliser, voire surabondant. En Nouvelle-Calédonie, l'arrivée de techniciens hydrographes calédoniens permet désormais de conduire des travaux en mer tout en poursuivant à terre le traitement des données acquises précédemment. La qualité des levés et leur temps de traitement s'en améliorent donc.

Le poste de CSL avait été envisagé de Papeete à Nouméa avant d'être finalement maintenu à Papeete pour faciliter le fonctionnement de l'échelon polynésien. Cette option s'est montrée pertinente pour assurer à bon niveau le rôle de représentant du directeur, mais reste sujette à la présence permanente du GOP en Polynésie française.

3.3 Locaux

A Nouméa, le GOP dispose de locaux mis à disposition par la Nouvelle-Calédonie dans le cadre de la convention de partenariat. Ils se répartissent entre des bureaux, un atelier, un hangar à bateau. La gestion de ces locaux est assurée par le service des phares et balises de Nouvelle-Calédonie. Ces locaux sont bien adaptés au format et à l'activité du GOP en Nouvelle-Calédonie. Néanmoins, si deux nouveaux techniciens hydrographes calédoniens venaient à être recrutés cela poserait des difficultés en salle de dessin qui ne peut pas accueillir plus de 6 postes, contre cinq occupés.

En Polynésie française, le GOP disposait jusqu'en octobre 2007 des locaux de la marine de Bir Hakeim. Il a ensuite déménagé en ZRN dans des locaux mis à disposition par la base navale suite aux difficultés de fonctionnement avec la Polynésie française mis en évidence à cette époque : ces locaux restent néanmoins exigües et ne disposent pas de salle de dessin. Ils permettent d'accueillir le bureau du chef du service logistique, un bureau avec le chef du service hydrographie et l'officier marinier hydrographe (OMH) programmeur et une pièce pour le secrétariat, le serveur et les personnels du service logistique. Le GOP disposait par

ailleurs jusqu'en décembre 2007 d'un local servant d'atelier en base navale de Papeete. La base navale a souhaité pouvoir en disposer pour ses besoins propres ce qui a compliqué la situation bien qu'un local partagé avec le service manœuvre a été mis à disposition en ZRN pour ranger la drome et le matériel scientifique.

Par ailleurs depuis octobre 2007 le GOP dispose de l'accès aux nouveaux locaux de la CHPF à Motu Uta. Une partie des matériels de la salle de dessin de Bir Hakeim y a été déménagée. Néanmoins, alors qu'il était envisagé d'y déménager totalement, les conditions de fonctionnement ont vite empêché de pouvoir y travailler totalement. Le SHOM y dispose d'une salle de dessin avec sa table, son traceur et des postes de traitement.

3.4 Véhicules

Le GOP est correctement doté en véhicule. Le renouvellement d'un véhicule militaire utilitaire en Nouvelle-Calédonie s'est effectué en juillet 2007 sur achat local, pratique expérimentée par la direction des commissariats d'outre-mer (DICOM) pour vérifier la faisabilité et mesurer les gains espérés. La Nouvelle-Calédonie met à disposition deux véhicules selon les termes de la convention de partenariat. Un troisième vieillissant, palliant le non renouvellement conjoncturel du véhicule utilitaire marine est désormais en supplément à la dotation prévue dans la convention de soutien. Néanmoins cela ne doit pas cacher une difficulté en Polynésie française où le parc vieillit. Jusqu'en septembre dernier il était prévu que la Polynésie française prenne à sa charge le remplacement du véhicule de liaison et l'utilitaire dont les échéances sont 2008 et 2010 respectivement, dès lors placés en réserve technique (période durant laquelle selon l'état du véhicule et les circonstances extérieures, le véhicule peut être déclassé à tout moment). La logique de partenariat ayant été dénoncée par la Polynésie française, ce remplacement n'est plus d'actualité et il faudra prévoir, si le SHOM venait à rester de façon permanente en Polynésie, leur renouvellement.

3.5 Moyens flottants

3.5.1 Navires

Pendant la période considérée, le GOP a mis en oeuvre plusieurs moyens :

- le baliseur polyvalent *Louis Hénin*, mis à disposition à hauteur d'un potentiel de 60 à 80 jours par an ;
- le baliseur polyvalent *Eugène Morignat*, mis à disposition à hauteur d'un potentiel de 20 à 30 jours par an.

Le personnel du GOP a aussi embarqué sur des bâtiments d'opportunité : P400 *La Moqueuse* et *La Glorieuse*, vedette de gendarmerie *Dumbéa*, FS *Prairie*, RHM (remorqueur de haute mer) *Revi*, vedette d'autorité du COMSUP mer PF. Bien que très utiles, ces moyens ne sont évoqués ici que pour mémoire.

Adéquation aux missions

Le *Louis Hénin*, dont la première mission d'hydrographie date de mars 2005, a démontré depuis sa capacité technique à assurer des missions d'hydrographie. Toutefois,

offrant trop peu de place aux personnels du SHOM (4 places pour 8 personnels d'équipage) et un trop faible rayon d'action dû à une faible autonomie (10 jours d'eau et de vivre, pour 5 jours initialement spécifiés) rendent des chantiers aux îles Loyauté complexes à réaliser (Tiga par exemple) mais aussi aux Belep, et impossibles aux Chesterfield, à l'île Surprise, ... Il reste néanmoins le navire amiral de la flotte mis à disposition du GOP.

L'*Eugène Morignat* est employé depuis plus longtemps et a permis d'hydrographier de grandes voies recommandées dans le nord et aux abords de Nouméa avant la mise en fonction du *Louis Hénin*. Ce petit catamaran, aux conditions de vie sommaires, est manoeuvrant et répond bien aux attentes en terme d'hydrographie côtière : il faut plus le considérer comme une grosse vedette hydrographique que comme un petit bâtiment hydrographique. Alors qu'il n'avait pas été utilisé de 2004 à 2006, un effort a été fait pour l'exploiter en 2007, ce qui s'est montré probant pour des chantiers près de Nouméa en complément du *Louis Hénin* pour des chantiers plus lointain. Il est souhaitable de l'utiliser annuellement afin de conserver le savoir-faire des personnels du GOP et de l'équipage.

Gestion

Ces deux porteurs sont armés par un équipage de la Nouvelle-Calédonie et sont gérés par le service des phares et balises. Les levés sont définis par le directeur et directeur technique du GOP (activités, chronologie en fonction d'un souci de meilleure efficacité et efficacité) et les commandants assurent, dans un bon esprit, la mise à disposition opérationnelle de leur navire dans le respect des contraintes de sécurité et logistiques.

Disponibilité

Ni le *Louis Hénin* ni l'*Eugène Morignat* n'ont eu d'indisponibilité pour raison mécanique. Celles-ci, récurrentes, sont sociales et indépendantes des activités hydrographiques. Pour illustration, le levé d'Ouvéa 2008, ayant pour enjeu la continuité territoriale de l'île d'Ouvéa, a été repoussé de mars à juin 2008 pour cela.

3.5.2 Embarcations

Le GOP disposait pendant la période :

- de la vedette *Chambeyron*, moyen mis à disposition par la Nouvelle-Calédonie à temps complet ;
- de deux corallines 18 pieds à Nouméa et Papeete respectivement, en cours de déclassement ;
- d'une VH8 de l'*Arago*, en cours de déclassement.
- d'une VH8 de l'*Arago*, déclassée (en cours de déclassement au début de la période considérée).

La vedette *Chambeyron* a été mise en œuvre au départ de Nouméa avec les moyens propres du GOP ou à partir du *Louis Hénin* sur lequel elle était transportée. Elle répond parfaitement aux besoins. Des travaux mineurs de meilleure intégration des systèmes ont été conduits et réfléchis pendant la période d'intérêt de ce rapport.

La VH8 de l'*Arago* n'a été que très faiblement utilisée lors de ses rares périodes de disponibilité avant de faire l'objet d'un déclassement.

Les corallines ont posé plus de difficultés. Acquises en 1996, leurs conditions d'usage définies en 1999 (Note N° 222 SHOM/EM/NP du 2 juillet 1999) et confirmées en 2008 (NE n° 67 SHOM/DO/MGS/NP du 24 janvier 2008) sont un déplacement maximal de 1 075 kg, une capacité de transport de 3 personnes et une limitation de propulsion limitée à 40 CV. Or un budget de masse réalisé au GOP pendant la période (NE n° 149 SHOM/GOP/NP du 3 décembre 2007) a révélé que la masse maximale totale (équivalent au déplacement maximal) en condition de levé hydrographique était au strict minimum de 1 290 kg soit 20 % au dessus des exigences. En conséquence, pour éviter d'être incité à utiliser ces porteurs en dehors des règles de sécurité et encourir des risques pour les biens et les personnes, considérant par ailleurs que les structures de ces porteurs sont vieillissantes (fissures des œuvres vives et mortes) et que le coefficient de sécurité du constructeur était de 25 %, il a été décidé de ne plus les utiliser. Par ailleurs le GOP a demandé leur déclassement.

Enfin, le GOP a étudié le recours à des embarcations d'opportunité mises à disposition par le service des phares et balises de Wallis, par la marine, le groupement du service militaire adapté (GSMA) ou des communes en Polynésie française, en vu des levés ultérieurs à la période considérée dans ce rapport. Même si elle nécessite d'équiper complètement un porteur non spécialisé (sondeur, système de localisation et d'acquisition), cette solution semble efficace et peu contraignante au vu d'autres contraintes de disponibilité de porteurs plus lourds notamment. Elle assure une plus grande souplesse d'action et une meilleure capacité de projection. C'est une voie à approfondir.

3.6 Matériel

On se limitera ici aux évolutions notables, et aux principaux problèmes rencontrés.

3.6.1 Localisation

Le SHOM dispose de plusieurs systèmes de géoréférencement des données recueillies, que ce soit en mer ou sur terre. Parmi ces systèmes, le GOP a utilisé le Z12 de la société Ashtech (en fin de vie), l'Aquarius 5002 de la société Thalès Navigation (déclaré obsolète par la société le 1^{er} janvier 2006) et le système 1200 de la société Leica Geosystems (en cours de déploiement au SHOM). Le système Seastar a également été utilisé (pour mémoire).

Le système Z12 était utilisé occasionnellement pour déterminer des points statiques et parfois des trajectographies : il est robuste mais peu mobile. Il n'équipait pas les porteurs par ailleurs. Les récepteurs GPS Aquarius 5002 présentent une très mauvaise dissipation thermique compte tenu de leur architecture, point particulier que Thalès Navigation, après l'avoir reconnu, a corrigé sur le modèle 5502 (évolution logique du récepteur utilisé par le SHOM). Aussi dans un climat tropical, son bon fonctionnement est rapidement et systématiquement remis en cause. La bonne conduite des travaux est donc systématiquement perturbée, impactant l'efficacité et l'efficacité des levés. Les couples de Leica 1200 reçus à Nouméa en juillet 2007 et à Papeete en avril 2008 répondent pleinement aux attentes : tenue à la chaleur,

mobilité importante sur porteur et en topographie y compris de plage en zone immergée, capacité de solutions post traitées consolidant grandement leur robustesse (avec le regret que Hypack ne permette pas encore de rejouer la localisation), facilité de déploiement et de mise en oeuvre.

Le service de positionnement et de géodésie du GOP s'appuie donc essentiellement sur les systèmes Leica 1200 disponibles à minima à Nouméa et Papeete à raison d'un seul couple. Pour pallier à cette carence, un couplage Leica (station de référence)/Aquarius a été mis en oeuvre avec succès. Les résultats de positionnement en mode DGPS de l'Aquarius ont montré une très grande stabilité dynamique et une incertitude meilleure que 50 cm par rapport à la solution RTK du Leica. Néanmoins les systèmes Aquarius montrent régulièrement des signes de vieillissement (figeage du système, perte de configuration) qui ne permettent pas d'en faire un système pérenne, bien qu'aujourd'hui il reste par défaut le système de positionnement d'un porteur lors de levés à deux porteurs, ce qui est nominal en Nouvelle-Calédonie.

Le système Seastar s'est montré décevant puisqu'un biais systématique de l'ordre de 3 à 4 m a été constaté au point fixe à Nouméa ce qui rend quasiment inaccessible la précision de la sonde requise en ordre 1 de la norme S44.

3.6.2 Informatique

Les serveurs du GOP à Nouméa et à Papeete ont été renouvelés en décembre 2006 et en novembre 2007. Ils apportent plus de facilité pour stocker de gros volumes de données et pour gérer leur archivage.

3.6.3 Bathymétrie

Sondeurs monofaisceaux

Le GOP dispose des sondeurs monofaisceaux EA400 de la société Kongsberg dans les versions portables ou non. Il est facilement mis en oeuvre et répond aux besoins dans le Pacifique, en le couplant systématiquement avec l'usage du sonar latéral. L'exploitation de son échogramme enregistré directement s'est révélée indispensable pour le traitement de la sonde, en réponse aux défauts de l'échogramme enregistré sous Hypack.

Sonars latéraux (Sonal)

Un travail important a été mené en collaboration entre les moyens généraux et spécifiques (MGS) et le GOP afin d'aboutir à un parc d'équipement robuste. Cela concerne la mise à disposition de câbles vedette de nouvelle génération sans bretelle, d'unités d'acquisition en nombre adapté. Le dernier travail en cours concerne le passage des câbles aciers avec une solution sans cloche qui devrait améliorer le système en le rendant plus robuste.

Sondeurs multifaisceaux (SMF)

La question de l'équipement du *Louis Hénin* par un SMF se pose de façon récurrente. Cet équipement permettrait d'être plus efficace en travaux de recherche (moins de recherche, réduction des temps propre de recherche). Il permettrait par ailleurs d'acquérir une connaissance plus exhaustive de la bathymétrie des eaux intérieures de la Nouvelle-Calédonie.

Cependant il est plus sensible et entraînerait des actions de maintien en condition opérationnelle (MCO) plus lourdes que la solution du système sondeur vertical/sonar latéral. Par ailleurs le système actuel répond aux besoins connus et prévisibles. En conséquence aucune action n'a été menée dans le sens de l'équipement d'un SMF.

3.7 Logiciels

Le principal logiciel utilisé par le GOP est Hypack pour la préparation, l'exécution, le traitement et la rédaction des levés hydrographiques. Il a évolué au cours de la période grâce aux échanges réguliers avec MGS qui a pris en compte les retours d'expérience du GOP qui est le principal utilisateur de ce progiciel au SHOM dans ce spectre d'utilisation. Bien que perfectible il semble atteindre un niveau de performance cohérent avec les attentes aussi bien sur le traitement du sonar que du sondeur et sur la rédaction. L'amélioration la plus attendue reste encore la bonne gestion des données sur le disque pour pouvoir rendre plus fonctionnel et donc plus sûr certaines tâches de déplacements « thématiques » de fichiers qui se sont révélés cruciaux pour conserver la maîtrise des traitements conduits.

Les développements internes au GOP ont par ailleurs été limités au strict nécessaire (fonctionnalités critiques de traitement).

4. MÉTHODES

La période considérée par ce rapport est fortement marquée par la nécessité de résorber le retard important dans le traitement et la rédaction des levés au GOP tout en maintenant un niveau d'activité de recueil d'information suffisant pour répondre aux besoins dans le Pacifique. Cette situation s'illustre par l'indicateur d'âge des levés qui culminait à 2,52 ans en juillet 2006 pour un objectif de 1,52 an alors et qui a été ramené à 0,85 an en août 2008 pour un objectif de 1,10 an.

Les causes anciennes de cette situation étaient un surcroît d'activité d'exécution au départ des BH2 *Laplace* et *Arago* mais plus sûrement aussi une carence méthodologique susceptible d'améliorer l'efficacité des traitements et leur efficacité.

Cette démarche a aussi permis de favoriser la capitalisation de la connaissance. Celle-ci est primordiale si l'on considère que les rotarys se font tous les deux ans et que celui de 2007 a concerné 100 % des personnels des services hydrographie (NC et PF) et 75 % de ceux du service logistique.

Enfin, dynamisée par la démarche qualité et les audits de certification, cela a permis de renforcer les vérifications métrologiques essentielles pour assurer la bonne qualité des informations produites.

4.1 Organisation et fonctionnement

Le GOP est une petite unité située à environ 20 000 km de Brest et par ailleurs répartie sur deux sites distants de 5 000 km. Le nombre de tâches techniques mais aussi administratives n'en reste pas moins important. La bonne organisation

de l'ensemble de ses moyens est donc essentielle pour parvenir à couvrir le spectre d'activité. Or, au début de la période d'intérêt, un OMH n'avait aucune activité de traitement et de rédaction au profit d'actions de soutien logistique (gestion du parc de matériel, entretien au niveau technique d'intervention (NTI) 1 et 1+, gestion des dossiers de transport en interface voire souvent en suppléance des prestataires). Le chef du service hydrographie de Polynésie avait quant à lui un tropisme trop marqué pour sa fonction de chef de la CHPF au sein de l'administration Polynésienne au détriment de ses tâches nominales de chef de service et d'adjoint opération au sein du SHOM en Polynésie française. Enfin, les liens entre les deux échelons étaient par ailleurs quasiment inexistantes. Une réflexion a donc été menée pour mieux répartir les tâches afin de voir chacun au GOP travailler le plus possible dans son cœur de métier.

Cela s'est traduit par :

- une nouvelle répartition des tâches douanières et techniques entre le service logistique trop peu impliqué jusqu'alors, l'OMH correspondant du service logistique pour les questions matériels et la secrétaire en Nouvelle-Calédonie ;
- la responsabilité de représentant du directeur du GOP en Polynésie attribuée à l'ingénieur logisticien, en charge notamment des relations quotidiennes avec nos interlocuteurs dont la Polynésie française et la marine. Il est également en charge de la bonne utilisation des moyens et de la tenue du programme. Le major peut ainsi se consacrer pleinement à ses fonctions de chef du service hydrographie et d'adjoint opération qui constitue le cœur de notre activité ;
- une répartition des tâches de traitement entre les échelons de Papeete et de Nouméa afin d'épurer des dossiers sans transfert de personnels. Ceci était possible grâce au partage d'informations et de méthodes et s'est avéré très efficace.

Cette formalisation a été introduite dans l'instruction permanente n° 1 du GOP.

4.2 Qualité

La faible expérience des nouveaux personnels à la conduite de levés hydrographiques avec un sondeur vertical, l'importance des renouvellements de personnels, atteignant son paroxysme en 2007 en concernant la quasi totalité des personnels du GOP, et l'éloignement sont des facteurs de risque de perte de connaissance et de défaut en terme de qualité associés au GOP.

Les efforts ont donc porté sur l'acquisition et le traitement des données, qui sont deux des fonctions de base des missions hydrographiques, mais aussi sur l'organisation de la logistique des levés et sur la capitalisation de la connaissance.

4.2.1 Acquisition

En matière d'acquisition, l'accent a été mis sur la formation de base à la mise en œuvre des équipements et la polyvalence. Des formations internes ont été données en fonction des besoins et des opportunités (contrôle métrologique, Leica, Seastar, sonal). Le guide utilisateur Leica 1200 a été rédigé à cet effet.

Une zone de référence a été créée dans chaque échelon. Elles permettent d'inter-comparer les mesures de « calibration » conduite périodiquement et si possible avant tout levé, avec un modèle de terrain haute résolution de référence. Ce modèle s'enrichit par ailleurs de toutes mesures conduites dessus avec des systèmes vérifiés à quai.

4.2.2 Traitement des données

En matière de traitement de données, le GOP s'est attaché à :

- définir les doctrines d'emploi : en redéfinissant en particulier le processus fondamental de l'acquisition à l'information contrôlée et validée ;
- formaliser les acquis, en enrichissant la documentation interne du SHOM par l'expérience du quotidien: le logiciel de traitement Hypack évolue régulièrement et son usage s'optimise avec le temps, ce qu'il est important de capitaliser ;
- standardiser les méthodes : choix des paramètres du traitement et de rédaction pour permettre de traiter et de rédiger au mieux en portant plus d'énergie sur l'analyse des données et des informations produites.

4.2.3 Documentation

En matière de documentation, des efforts ont été accomplis dans trois directions principales :

- vérification métrologique : une procédure spécifique a été rédigée afin de définir les actions à accomplir en la matière ;
- conduite des levés : un mode opératoire capitalise l'information connue relative à la conduite d'un levé dans le Pacifique. Il décrit notamment dans le détail le processus de traitement (contrôle, correction, qualification) des données ;
- définition de rapports particuliers-types : insérés comme pièces jointes du mode opératoire décrit supra.

4.2.4 MCO (maintien en condition opérationnelle)

Une action forte et permanente de sensibilisation a été lancée depuis 2007 au GOP sur l'entretien quotidien de l'ensemble des matériels. Cela concerne les actions de prévention quotidienne sur le terrain (en vedette, sur le *Louis Hénin*, en travaux à terre, ...) et les actions de reconditionnement. Ces actions sont élémentaires et fondamentales pour la durée de vie des matériels, pour la disponibilité des services et pour leur qualité.

5. TRAVAUX SOUS CONVENTION

Aucun levé sous convention n'a été conduit pendant la période. Des travaux qualifiés d'hydrographie civile l'ont été mais sous la forme de levés d'hydrographie générale. Les raisons sont multiples : volonté des présidents de la commission hydrographique de conduire certains levés du fait de leur importance stratégique (Port de Prony, baie des Dames) ; convention type du SHOM opposant une clause de responsabilité totale du client considérée inacceptable par eux ; non maîtrise par le GOP de la stratégie et des éléments de langage du SHOM en la matière, considérant que tout levé répond d'une façon ou d'une autre à un besoin d'hydrogra-

phie générale. Dans la continuité des travaux en cours sur la tarification des travaux, une organisation adaptée devra être définie pour faciliter les travaux d'hydrographie civile.

6. LES PARTENARIATS ÉTAT/PAYS

6.1 En Nouvelle-Calédonie

En Nouvelle-Calédonie des travaux préparatoires à un possible transfert de compétence en matière de sécurité de la navigation sont en cours. Le périmètre des compétences transférables devrait être figé lors d'un comité de pilotage présidé par le Haut commissaire de la République (HCR) de Nouvelle-Calédonie et composé des représentants des diverses sensibilités de la société civile de la Nouvelle-Calédonie, au second semestre 2008. Il s'agit avant tout d'une démarche politique et la volonté affichée est néanmoins le respect strict des accords de Nouméa comme l'a rappelé le premier ministre, M Fillon, le 20 décembre 2007 lors de la réunion du comité des signataires de l'accord de Nouméa. A ce titre il est impossible de se prononcer définitivement sur le fait que l'hydrographie dans les eaux intérieures et territoriales sera transférée mais le domaine de la sécurité de la navigation est jugé sans passion et simple à transférer, ce qui n'ai pas le cas d'autres sujets.

La Nouvelle-Calédonie se prépare à ce transfert en soutenant le SHOM en application de la convention de partenariat qui est en cours de réédition : celle-ci est en cours de visa. Le point marquant est la prise en compte du poste de la secrétaire calédonienne employée depuis 2004 au GOP mais surtout de ceux des deux nouveaux techniciens hydrographes formés par le SHOM. Ceux-ci sont intégrés au service hydrographie de Nouvelle-Calédonie du GOP et sont gérés, avec des spécificités liées à leur statut, de façon relativement autonome vis-à-vis de la Calédonie.

Si le transfert de compétence est demandé par la Nouvelle-Calédonie, l'organisation à viser pour consolider le bon fonctionnement de l'édifice semble être la constitution d'un service mixte au même titre que le service météorologique (convention Météo France/Nouvelle-Calédonie), sous couvert d'une convention. Cela permettrait clairement de légitimer le directeur de l'unité comme gestionnaire autorisé des personnels et des crédits mis à disposition par la Nouvelle-Calédonie. Il disposerait de l'ensemble des moyens de façon intégrée, dans un souci d'efficacité et d'efficience. Pour cela il serait désigné par le directeur général en tant que directeur et/ou directeur technique du GOP et recevrait « une lettre de mission » du gouvernement calédonien le désignant comme chef de l'entité mixte pour sa partie calédonienne. Une autre solution identifiée est le détachement de personnels d'encadrement du SHOM dans un service de la Nouvelle-Calédonie comme cela se pratique à la direction des infrastructures, de la topographie et des transports terrestres (DITTT) par exemple. A défaut, le soutien devrait perdurer mais dans une situation d'adossement dont le succès dépend plus des relations individuelles : le GOP demande des prestations prises en compte dans la convention de partenariat. Cette future organisation dépend avant tout du choix de la Nouvelle-Calédonie sur la manière dont elle souhaite assumer sa compétence.

Il n'y a pas de revendication visible de prise de pouvoir par la Nouvelle-Calédonie mais le souci d'être acteur de son avenir. A ce titre elle souhaite disposer de personnels compétents en propre ou avec le concours du SHOM qui lui apparaît naturel et incontournable.

6.2 En Polynésie française

La situation politique très instable et les difficultés locales de faire travailler en bon intelligence des services de l'État et de la Polynésie française rendent les relations de partenariat du SHOM avec elle difficile.

La compétence de la Polynésie française en matière de sécurité de la circulation maritime dans les eaux intérieures est inscrite dans la loi organique de 1996 (art 27.11°) portant statut d'autonomie de cette collectivité d'outre-mer. A priori l'hydrographie est un élément majeur de la sécurité de la navigation, au même titre que le balisage et est donc interprétée comme une compétence transférée dans les eaux intérieures. Néanmoins une analyse juridique des services du Haussariat datée du 30 octobre 2007 laisse entendre que l'hydrographie n'est qu'un moyen pour permettre à la Polynésie française d'assumer ses compétences en matière de sécurité de la navigation. A ce titre elle ne serait pas transférable au sens de la loi organique mais ferait l'objet de l'article 169 de la LO de février 2004 relatif aux concours de l'État.

Par ailleurs la convention de partenariat du 26 janvier 2006 est très ambiguë sur la question des responsabilités et du fonctionnement dans le cadre du partenariat. La pierre d'achoppement est le statut de la CHPF. Elle était considérée comme une structure mixte par le SHOM et comme une structure polynésienne par la Polynésie française avec des moyens mis à sa disposition par le SHOM qui n'avait plus droit d'intervention dessus et donc plus de capacité à assumer ses responsabilités au titre de l'ensemble de ses missions non transférées. Le GOP a donc contribué activement pendant ces deux années à trouver une solution permettant de fonctionner en bonne intelligence, avec le soutien du Haussariat. Ceci a permis d'aboutir au constat que seul un concours de moyen pouvait fonctionner et à une proposition de plan de travail commun annuel définissant les travaux qui pourraient être mutualisés avec la liste des moyens associés. Sur demande du Haussariat, le président de la Polynésie française a accepté de travailler à un nouveau projet de convention. Ces travaux, sur cette base, n'ont pas encore été entamés.

La situation est donc désormais claire avec une entité technique polynésienne, la CHPF, en charge des affaires d'hydrographie relevant de la Polynésie française. Celle-ci bénéficie du concours du SHOM et en particulier du GOP en terme d'expertise pour lui permettre d'atteindre le meilleur niveau pour conduire ses travaux. Le SHOM sur demande de la CHPF, dans le cadre du plan de travail commun basé sur les besoins exprimés et analysés en commission hydrographique présidée par la Polynésie française, est susceptible de participer aux travaux d'exécution et de rédaction et d'assurer la formation des personnels polynésiens.

Néanmoins, dans les faits, la Polynésie française, au travers de sa direction de l'équipement (DEQ) et de son arrondissement maritime, a décidé de contractualiser (juillet 2008) la

conduite des levés à une société privée sans solliciter le concours du SHOM, levés non analysés par ailleurs en commission hydrographique qui n'a pas été réunie en 2008 pour l'année 2009. Cette situation est à rapprocher du domaine des affaires maritimes et de la coordination des secours en mer où il y a une duplication systématique rendus nécessaires des services de l'État et de la Polynésie française sans aucune mutualisation de moyens.

De fait elle conduit à court terme le SHOM à ne plus participer aux levés d'hydrographie générale dans les eaux intérieures de la Polynésie française. Une des conséquences est que le concours qu'il pourrait être amené à apporter à la Polynésie française, au-delà de ceux fournis actuellement et destinés à lui offrir une capacité satisfaisante en terme de moyen, ne nécessite plus une présence permanente du SHOM en Polynésie.

7. COMMUNICATION

Le SHOM a un gros défaut de lisibilité dans le Pacifique auprès du public mais aussi des autorités militaires et civiles. Cette situation est due à la trop forte personnalisation des bases hydrographiques du GOP ou du GOP lui-même. Bien que ce constat ait été fait, peu d'actions ont pu être menées pendant la période : mis en place du logo SHOM sur les articles locaux de représentation, acquisition d'autocollants SHOM pour identification des véhicules et des locaux en remplacement d'une identification BHNC et BHPF. L'étape suivante serait de pouvoir nommer le GOP comme étant le « SHOM (antenne) Pacifique » pour un usage externe, la dénomination GOP étant réservée à un usage interne selon les cas. Le directeur du GOP serait ainsi le directeur de l'antenne du Pacifique du SHOM.

8. BILAN

8.1 Nature des travaux à mener dans le Pacifique

Les travaux hydrographiques connus ou prévisibles à conduire par le SHOM dans le Pacifique sont de l'hydrographie littorale ou côtière de faible extension géographique (HG, HOM, PPM), ou de l'hydrographie pour l'amélioration de la connaissance hydrographique essentiellement au-delà du plateau continental. L'exception notable est le Grand Lagon Nord, en Nouvelle-Calédonie, où le besoin n'est pas primordial aujourd'hui, le projet de navigation lagonaire des paquebots ayant été abandonné.

Par nature, ces travaux sont souvent dans des endroits éloignés (cas de l'ensemble de la Polynésie française) dont l'accès ne peut se faire que par voie maritime ou aérienne nécessitant un concours systématique civil ou militaire. Ils sont susceptibles, pour les travaux d'hydrographie militaire ou d'AEM de devoir être réactifs : exemple du crash du Twin Otter de Moorea ; contribution à des actions de soutien aux populations en Nouvelle-Calédonie, à Wallis et à Futuna et en Polynésie française mais aussi dans les Vanuatu ou les Salomon principalement.

Néanmoins si les COMSUP affirment le principe du besoin de travaux d'HOM dans leur zone de responsabilité, force est de constater qu'aucun besoin pour les trois années à

venir n'est exprimé. Cela est conforté par la réduction très sensible du format des forces armées en Polynésie française dans les trois années à venir et les incertitudes sur l'éventuel programme de remplacement des BATRAL qui n'aurait plus de capacité de plageage mais disposerait d'un radier pour une unité de plageage. Ce qui apparaît régulièrement en revanche sont des demandes inopinées de faible à moyen préavis.

De plus la contractualisation au profit d'une société privée des levés hydrographiques de sa responsabilité y réduit très sensiblement les actions d'hydrographie générale en Polynésie française.

8.2 Organisation et fonctionnement

Dans un premier temps, la clarification fonctionnelle des postes de dimensions organique et opérationnelle a permis de rendre l'organisation plus souple en fonction des compétences respectives des individus : cette souplesse est primordiale pour une petite entité qui doit pouvoir travailler en autonomie. Cette organisation est un des atouts qui a permis de redresser la situation du GOP. Mais l'élément majeur est la consolidation et la définition de méthodes relatives au contrôle métrologique, à la préparation, l'exécution, la rédaction et la qualification des données. Ceci a permis de réduire très fortement le nombre de non-conformité rendant les levés non intégrables, de réduire le nombre de levés par technicien hydrographe à 1 et enfin de réduire l'âge des levés à 0,85 an.

L'enjeu majeur à relever reste désormais la définition d'une organisation stable apte à répondre aux missions du SHOM dans le Pacifique en prenant en compte les partenaires polynésiens et calédoniens du fait de leurs compétences effectives ou attendues en matière d'hydrographie pour la sécurité de la navigation et l'évolution du format des armées dans le Pacifique.

8.2.1 En Nouvelle-Calédonie

L'organisation en partenariat avec la Nouvelle-Calédonie fonctionne bien. La Nouvelle-Calédonie apporte des moyens afin que le SHOM lui transfère des compétences dans la durée.

Dans la situation actuelle, le plan d'armement du GOP (ingénieur, OMH, OM, plongeur) renforcé d'un technicien hydrographe calédonien permet d'assurer une conduite et une rédaction compatible avec les objectifs de réactivité et de qualité recherchés en exploitant au mieux les moyens mis à disposition. L'affectation du second technicien libérera plus de temps pour la formation et surtout pour les travaux liés au soutien des PPM (réseau marégraphique, expertise, ...).

Si la Nouvelle-Calédonie décide de recruter un ou deux autres techniciens hydrographes comme le membre du gouvernement en charge du transport le souhaite pour des raisons politiques, une fois ces personnels formés, le retrait d'un OMH devra être envisagé. Cela ne devrait pas se produire avant 2013. Nous serons a priori alors à un an de l'autodétermination.

Le plan d'équipement, drome comprise, permet quant à lui de travailler en Nouvelle-Calédonie mais est faiblement por-

table pour se projeter efficacement dans les dépendances (Chesterfield, D'Entrecasteaux, ...), à Wallis et Futuna et éventuellement en Polynésie française.

Enfin deux incertitudes perdurent. A court terme, si l'hydrographie dans les eaux intérieures et territoriales est transférée, quel sera le régime/position administrative des personnels du SHOM, sachant que 3,4 ETP (équivalent temps plein) avaient une activité dédiée à ce domaine en 2007 au GOP ? Quelle sera la nature de la convention entre la Nouvelle-Calédonie et le SHOM ? A moyen terme, quel sera le choix de la Nouvelle-Calédonie en terme de maintien du soutien au profit du SHOM dès lors qu'elle aura acquis les compétences suffisantes (2014 environ).

8.2.2 En Polynésie française

Le partenariat avec la Polynésie française est réduit à minima au concours du SHOM pour l'accompagner vers sa prise de compétence pleine et entière. Cette situation, devenue inéluctable, est recommandée par le Haussariat qui juge d'avance infructueuse toute tentative de mettre en place un fonctionnement plus proche d'un service de l'État et de la Polynésie française sur des compétences transférées. Le GOP achève la mise à niveau de la vedette hydrographique de la CHPF et propose toujours de former son personnel. La Polynésie française contractualise des levés à une société privée.

Après avoir achevé la rédaction des levés conduits par le SHOM, le plan d'activité est désormais réduit à l'expertise en matière marégraphique et à de l'entretien de compétences pour être prêt à intervenir sur une demande du COMSUP ou du HCR. Les personnels sont donc désormais dans une situation de sous activité durable. Celle-ci était latente depuis quelques années mais en partie cachée par le retard accumulé en rédaction et l'espoir de voir une structure mixte active se créer. Par ailleurs les conditions de travail sont dégradées par les tensions toujours sensibles avec la Polynésie française et la réduction de l'espace de travail.

9. PROPOSITION : RECENTRAGE EN NOUVELLE-CALÉDONIE DÈS 2009

A la lumière de ce bilan, un recentrage du GOP sur la Nouvelle-Calédonie apparaît comme une solution stable, efficace et efficiente d'une part, cohérente avec les réformes en cours du ministère de la défense et de l'État, notamment en Polynésie française. L'ensemble des travaux d'hydrographie et d'expertise serait conduit à partir de la Nouvelle-Calédonie avec des présences régulières à Wallis et Futuna et en Polynésie française selon les besoins.

9.1 Plan d'armement

Le poste de chef de service logistique serait transféré de Papeete à Nouméa et celui de son adjoint y serait supprimé. Les autres postes actuellement ouverts en Polynésie française seraient fermés sans basculement en Nouvelle-Calédonie où, numériquement, l'effectif serait stable. Cette situation a l'avantage de rapprocher l'adjoint logistique du directeur et directeur technique et de faciliter les échanges par une concentration des moyens. Les gains de productivité

obtenus au GOP depuis deux ans, complétés du renfort des personnels calédoniens pour les travaux à conduire en Nouvelle-Calédonie, le volume de travail estimé à accomplir à Wallis et Futuna (2 semaines/an pour 3 pax) et en Polynésie française (4 semaines/an pour 4 pax) permettent d'envisager sereinement cette situation. Cela nécessite par ailleurs, au-delà de la conduite des levés, une présence régulière du directeur du GOP ou de son représentant en Polynésie française (2 semaines/an) pour y rencontrer les autorités militaires et civiles de l'État et de la Polynésie française afin d'y maintenir un lien étroit et garantir que les besoins seront exprimés et la mission de soutien du SHOM rendue.

9.2 Plan d'équipement

Le regroupement du GOP en Nouvelle-Calédonie permettrait d'améliorer la gestion du parc de matériel, en garantissant un plan d'équipement adapté aux missions avec des redondances suffisantes.

La démarche engagée vers une capacité hydrographique déployable du GOP devra alors se concrétiser afin de pouvoir conduire des travaux dans les zones les plus éloignées de la Nouvelle-Calédonie (Surprise, Chesterfield, Matthew, Hunter, ...), à Wallis et Futuna et en Polynésie française.

Cela implique l'équipement en systèmes sondeur et sonal plus légers que ceux actuellement disponibles (embase sur coque avec sabot amovible, sonal tracté, taille réduite...). Cela implique également la capacité d'installer un système hydrographique (sondeur/sonal/localisation) sur un porteur d'opportunité (zodiac, vedette légère, ...) nécessitant donc une protection aux embruns. Dans une moindre portée, cela implique également une plus grande interopérabilité des moyens en prenant en compte les contraintes les plus fortes donc un travail en vedette : les systèmes doivent être avant tout portables.

La solution des porteurs d'opportunité doit être approfondie. Elle permettrait d'assouplir les contraintes de déploiement et faciliterait la réactivité. Une première liste a été initiée mais doit faire l'objet d'une analyse plus poussée. A Wallis, le service de balisage des travaux publics peut mettre à disposition une vedette apte à travailler dans le lagon et dans ses abords extérieurs. Des aménagements légers devraient être conduits par ce service pour permettre de fixer les perches supports du sonal et du sondeur. Il reste néanmoins à concevoir un poste de travail d'acquisition fonctionnel et robuste aux embruns. En Polynésie française la préparation des travaux à Hao a permis d'identifier la vedette d'autorité du COMSUP mer (à titre a priori exceptionnelle), mais aussi une vedette de la commune et un moyen du GSMA. Ce travail doit être poursuivi.

L'identification de porteurs d'opportunité doit s'accompagner également d'un plan type d'intégration pour assurer la mise en place efficace et réactive des systèmes. Une contrainte majeure est la protection des systèmes aux embruns et un volume minimal.

Par ailleurs, il paraît indispensable de conserver une autonomie minimum de moyen vis-à-vis des collectivités parte-

naires pour être toujours capable, en cas de conflit d'intérêt, de conduire les missions du SHOM au profit de l'État. La traduction de cette exigence dépend des systèmes hydrographiques disponibles et de leur exigence technique.

9.3 Fonctionnement : est-il concevable de tout gérer de Nouvelle-Calédonie avec efficacité et efficience ?

Le recueil de besoins se fait par l'intermédiaire des commissions hydrographiques et par les COMSUP mer pour les besoins militaires. Ils ne nécessitent donc pas une présence sur place permanente. Cela implique néanmoins que le SHOM soit identifié comme le partenaire ou l'entité en charge de ces questions. Cela peut être assuré par une présence régulière du directeur sur place, estimée à 2 semaines de mission par an. La gestion à distance se fait d'ores et déjà pour Wallis et Futuna où la responsabilité en terme d'hydrographie générale est celle de l'État.

La définition technique des travaux se fait à partir de la connaissance locale issue de la documentation nautique, des levés antérieurs et d'échanges éventuels avec des personnes impliquées. Idéalement elle se fait après une première reconnaissance terrain. Dans la pratique, l'éloignement des sites est tel que ces reconnaissances ne se font pas le plus souvent. Pour améliorer encore cet accès à une connaissance locale, il pourrait néanmoins être judicieux de conserver un poste de réserviste qui servirait ainsi de pivot en Polynésie française.

Pour la conduite des levés, le déploiement des moyens est l'élément critique. D'un point de vue personnel, il faudrait compter sur 4 personnes pendant un mois en Polynésie française et 3 personnes pendant 2 semaines à Wallis ou Futuna annuellement. Ces déplacements seraient à financer sur les frais de déplacement, éventuellement recouverts dans le cadre d'une convention selon la nature de la mission. Ce fonctionnement est efficient : ce financement est à comparer à l'affectation permanente d'un ingénieur, de 4 officiers marins et d'un personnel d'équipage en Polynésie française.

Pour le matériel, il serait bon de prépositionner de façon permanente des petits matériels ne nécessitant pas de gros entretiens (pieds de théodolite, cages de marégraphes, gueuses, petits outillages, ...) en Polynésie française afin d'alléger l'expédition de matériel. Le reste des matériels peut être transporté en envoi temporaire par un transporteur si le préavis est supérieur à 3 semaines, ce qui est le cas nominal. La question des porteurs est la plus critique. Soit des moyens d'opportunité sont identifiés et utilisables, moyennant la préparation de l'appareillement des systèmes hydrographiques, soit un moyen prépositionné est maintenu en Polynésie française. L'idéal serait de conserver un moyen mobile léger pré positionné apte à assurer l'acquisition de données et d'identifier des moyens d'opportunité. Selon les travaux à conduire ou les contraintes, cela permettrait de préserver au mieux les possibilités de conduire les levés. Techniquement le prépositionnement d'un moyen nautique ne semble pas poser de problème.

Le traitement des données et la rédaction finale ne nécessitent pas d'être présent de façon permanente. Néanmoins, mais cela est vrai pour tous les chantiers, il est indispensable

de traiter suffisamment les données sur le terrain afin de s'assurer qu'aucun oubli majeur ne nécessiterait de revenir sur zone sauf à dégrader considérablement la qualification des données. Le levé de Moorea a d'ailleurs été traité partiellement en Nouvelle-Calédonie et il a été transmis de Nouvelle-Calédonie où le contrôle final y aura été conduit. Les levés de Wallis et de Futuna sont également déjà traités de cette façon. De façon plus fine, les levés conduits dans tous les archipels de la Polynésie française (Marquises, Australes, Gambier, Tuamotu, Société) peuvent être d'ores et déjà considérés comme traités et rédigés à distance.

Préparer, conduire et traiter les travaux de Nouvelle-Calédonie ne pose donc aucune difficulté particulière. Au contraire le gain serait une organisation simplifiée dynamisant son fonctionnement. Sa meilleure compacité serait plus efficace en lui apportant une meilleure redondance et donc disponibilité de ces matériels. Le SHOM conserverait pour autant sa compétence dans la conduite de travaux en Polynésie française et conserverait une bonne lisibilité extérieure au travers de relations avec les autorités civiles et militaires de la Polynésie française maintenues, entretenues et simplifiées. Cette nouvelle organisation serait aussi plus efficace avec des personnels déployés en fonction des besoins.

9.4 Un recentrage en 2009 ?

Un tel recentrage en 2009 correspond à l'achèvement des travaux de mise en place technique de la structure polynésienne avec une vedette *Toa Nui* en principe opérationnelle dès 2008 grâce aux efforts importants consentis par le GOP. Cela correspond à l'implantation achevée des observatoires de marée permanents de Polynésie française. Cela correspond également à une période de renouvellement quasi totale de personnels qui facilite la gestion de la fermeture de la BHPF, notamment en terme de gestion des personnels. Cette date est par ailleurs cohérente avec les besoins et l'évolution de l'implantation du ministère de la défense en Polynésie française.

9.5 Conclusion

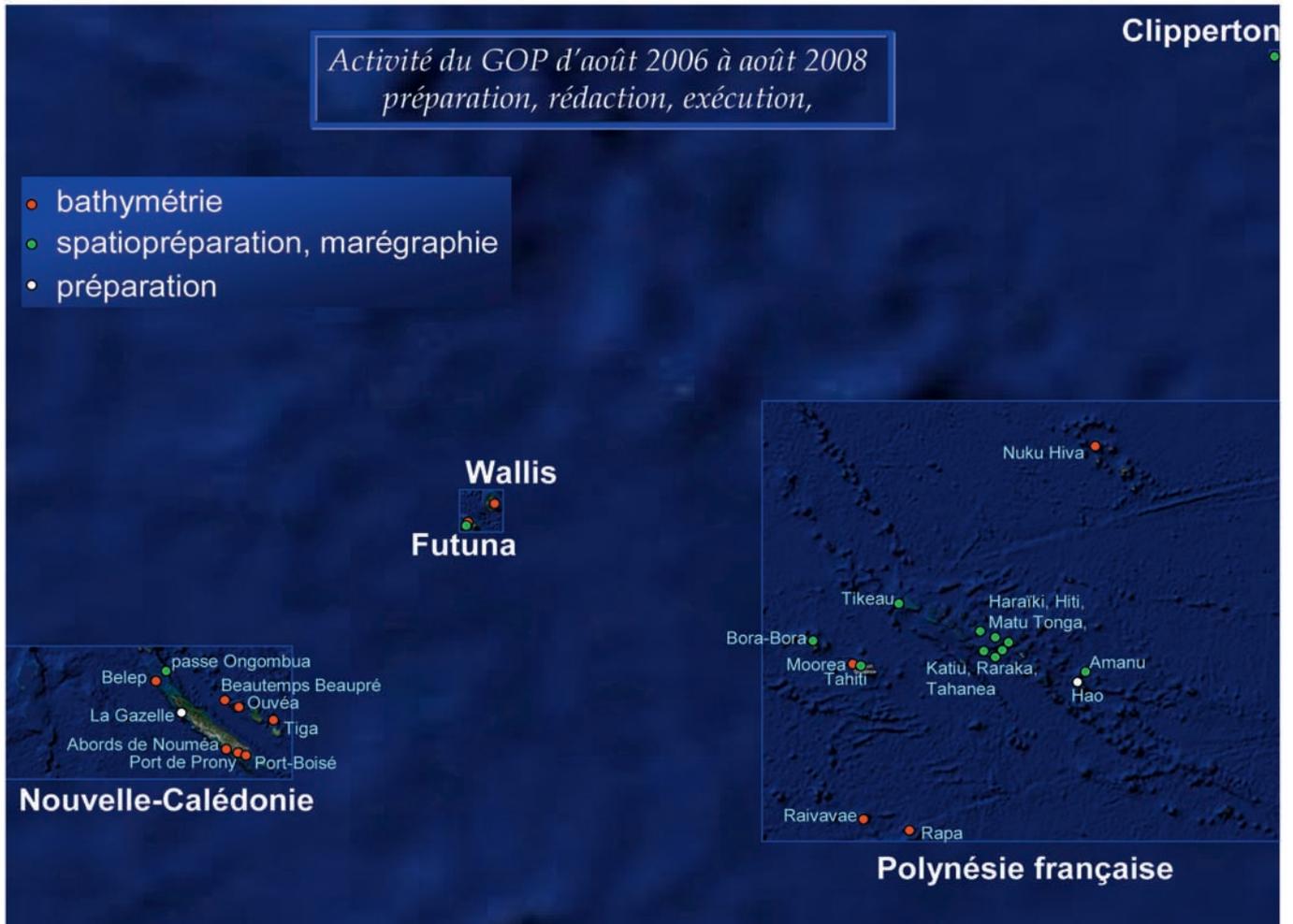
En conclusion un GOP regroupé en Nouvelle-Calédonie offre l'avantage de réduire sensiblement les coûts, de pallier aux inconvénients dus à la dispersion actuelle sur deux sites distants de 5 000 km et donc d'améliorer l'efficacité du GOP, d'améliorer la disponibilité du parc d'équipement. Ce regroupement ne nuirait pas à la qualité des travaux ni à leur ampleur. Il pourrait avoir l'avantage de simplifier encore les relations avec la Polynésie française, l'éloignement rendant plus évident la contractualisation des concours de chacun (programme de travail commun). Une vigilance particulière serait à porter au maintien des bonnes relations avec les autorités civiles de l'État et de la Polynésie française, tout comme à Wallis, et avec les autorités militaires dans un contexte où les moyens militaires vont se concentrer également en Nouvelle-Calédonie. L'évolution des systèmes hydrographiques du GOP vers une plus grande capacité de déploiement devra être menée à bien en parallèle pour améliorer son efficacité. Par ailleurs la question du prépositionnement éventuel des moyens doit être approfondie. Enfin le maintien d'un poste de réserviste sur place pour 30 jours serait très utile.

Ce choix serait en définitive cohérent avec l'analyse du directeur de la MOP en 2001 qui alertait déjà sur les difficultés pressenties de maintenir une activité efficace et efficiente en Polynésie française. Il serait également cohérent avec les conditions de maintien en Polynésie française que le bureau « établissement – missions » du SHOM (SHOM/EM) précisait en 2003 et qui ne sont absolument pas réunies et pris à son compte par le Haussariat de Polynésie française en 2003. Force est de constater au vu de l'activité véritable de la MOP puis du GOP depuis 2002 et le départ de l'*Arago* que l'activité réelle conduite par le SHOM en Polynésie française est très faible et qu'un maintien permanent apparaît inapproprié.

ANNEXE I : Références des rapports particuliers

Intitulé	N° du levé	Référence du rapport particulier
Nouvelle-Calédonie		
Levé des voies recommandées boîtes 2, 3, et 4	S200608700	N° 361 MOP/NP du 18/12/06
Levé de la voie recommandée de l'îlot Porc-épic à île Ouen	S200702400	N° 094 SHOM/GOP du 02/10/07
Levé de modification voie recommandée de la passe de Uïtoe à Nouméa	Non défini	En cours
Travaux hydrographiques en baie des dames	S200602900	N° 303 MOP/NP du 23/10/06
Travaux hydrographiques en base navale de Nouméa	S200608500	N° 341 MOP/NP du 05/12/06
Travaux hydrographiques de la passe du d'Estrées à l'île d'Art	S200702500	N° 142 MOP/NP du 05/06/07
Travaux de plage de Aue (Art)	S200705700	N°155 SHOM/GOP/DR du 07/12/07
Travaux hydrographiques de la baie de Uala à la baie de Aue (Art)	S200712300	N° 021 SHOM/GOP du 12/02/08
Travaux hydrographiques aux abords du port de Prony (Goro Nickel)	S200700400	N° 038 MOP/NP du 22/02/07
Travaux hydrographiques à Ouvéa	S200707100	N° 077 SHOM/GOP du 17/09/08
Travaux hydrographiques à Ouvéa	S200707200	N° 28 SHOM/GOP/NP DU 21/02/08
Travaux hydrographiques à Ouvéa	S200805200	
Travaux hydrographiques à Tiga	S200707300	N° 54 SHOM/GOP du 19/03/08
Travaux à Port Boisé	S200603000	N° 301 MOP/NP du 23/10/06
Travaux au site n° 5 du Mont-Dore	S200605900	N° 015 MOP/NP du 23/01/07
Travaux topographiques à Nouméa	S200800900	N° 030 SHOM/GOP/NP du 21/02/08
Wallis et Futuna		
Travaux hydrographiques à Wallis	S200608800	N° 068 MOP/NP du 21/03/07
Travaux de spatiopréparation à Futuna	S200703400	N° 115 SHOM/GOP/NP du 21/07/08
Travaux de plageage à Futuna	S200606300	N° 293 MOP/DR du 09/10/06
Polynésie française		
Spatio-préparation à Haraïki et Hiti	S200606900	N° 307 MOP/NP du 27/10/06
Stéréopréparation à Amanu	S200607000	N° 308 MOP/NP du 27/10/06
Spatio et stéréopréparation à Tikeau	S200703200	N° 165 SHOM/GOP/NP du 13/12/07
Spatio-préparation à Tahanea	S200608200	N° 338 MOP/NP du 24/10/06
Spatio-préparation à Katiu, Raraka et Motu Tunga	S200609100	N° 05 MOP/NP du 08/01/07
Levé de plage à Rapa	S200608100	N° 035 MOP/NP du 19/02/07
Levé de plage à Raivavae	S200606500	N° 300 MOP/NP du 23/10/06
Levé de plage à Nuku-Hiva		
Travaux de géodésie - spatiopréparation archipel des Tuamotu	S200603500	N° 163 MOP/NP du 05/07/06
Travaux d'accès à Raivavae	S200705000	N° 145 SHOM/GOP/NP du 28/11/07
Travaux hydrographiques à Moorea (baie d'Opunohu)	S2008005	N°97 SHOM/GOP/NP du 24/06/08
Divers		
Travaux hydrographiques à Vanikoro	S200805100	N°104 SHOM/GOP/NP du 04/07/08
Mesures de courant au point fixe en ZRN de Papeete	S200702200	N° 153 MOP/NP du 13/06/07

ANNEXE II : Localisation des zones de travaux



ENCART PHOTOGRAPHIQUE I : Travaux hydrographiques

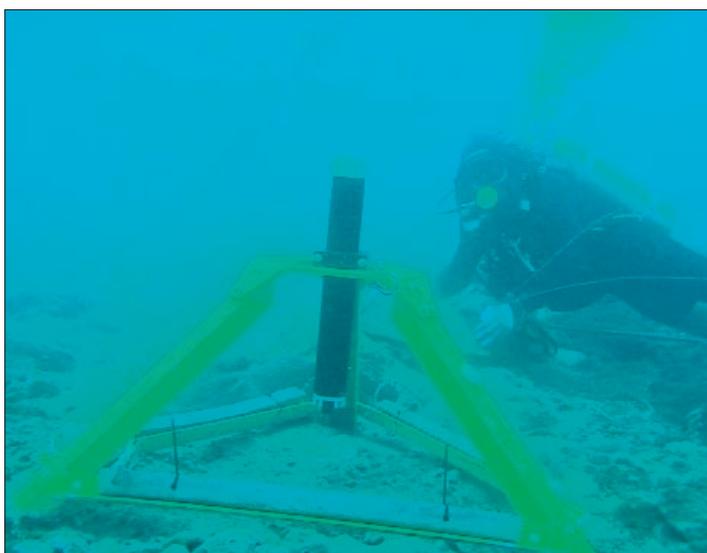
TRAVAUX DE LA BHPF



Travaux géodésiques à Clipperton



Levé topographique à Moorea



Mouillage d'un courantomètre dans les passes de Papeete

TRAVAUX DE LA BHNC



Levé topographique au GPS Leica aux Belep



Plageage à Ouvéa



Travaux géodésiques à Vanikoro



Travaux hydrographiques à Beautemps-Beaupré



Le *Louis Hénin* à Ouvéa



Reconnaissance vers Tiga en Super Puma

ENCART PHOTOGRAPHIQUE II : Faits marquants



Le directeur général du SHOM en inspection au GOP



8^e CHRPSO¹ à Tahiti



Commission hydrographique à Nouméa



Visite à bord de l'HMS *Melville*



Coutume à Tiga

¹ Commission hydrographique régionale du Pacifique sud-ouest

Imprimerie du Service hydrographique et
océanographique de la marine
13 rue du Chatellier
CS 92803
29228 BREST CEDEX 2
Novembre 2010

Dépôt légal quatrième trimestre 2010
Numéro d'éditeur : 2806

SOMMAIRE

Première partie

Éditorial : L'océanographie acoustique au SHOM,
par l'ICT Y. STÉPHAN

Surveillance, Étude et Reconnaissance de l'ENVi-
ronnement par Acoustique DiscrèteE : le séminaire
SERENADE par l'ICT Y. STÉPHAN, C. GERVAISE et
C. LIRET

La tomographie acoustique océanique : technique du
passé ou de l'avenir ? par l'ICT Y. STÉPHAN,
J-P. HERMAND et C. GERVAISE

Assimilation de données acoustiques : suivi du front
d'Ouessant par O. CARRIÈRE, J-P. HERMAND et
l'ICT Y. STÉPHAN

Étude acoustique du bruit de mer par X. DEMOULIN

Monitoring acoustique passif des campagnes d'océa-
nographie acoustique en présence de mammifères
marins : exemple de la campagne ERATO-09
par C. GERVAISE, L. DI IORIO, B. KINDA,
l'ICT Y. STÉPHAN et N. JOSSO

Détection des clics de baleines à bec par
O. GÉRARD, C. CARTHEL et S. CORALUPPI

Sono-Proxy : un capteur non intrusif du com-
portement de la coquille Saint-Jacques par
B. KINDA, C. GERVAISE, L. CHAUVAUD, V. JAUD,
S. BUSSON et T. ROBSON

Observation de la posidonie par acoustique
par J-P. HERMAND

Deuxième partie

Mission océanographique du Pacifique - (janvier 2000
- juillet 2001), par l'ICA M. EVEN

Mission hydrographique de l'Atlantique - (août 2002 -
juillet 2005), par l'ICETA H. DOLOU

Travaux hydrographiques aux îles Kerguelen - (1996
- 2003), par le MP P. BOURZEIX, l'ICETA H. DOLOU
et le MJR H. THOMAS

Groupe océanographique du Pacifique - (août 2006 -
août 2008), par l'IPA D. CRÉACH

ANNALES HYDROGRAPHIQUES 776



ISBN 978-2-11-097273-6