

Annales Hydrographiques

6^e Série - Vol. 5

N° 774



Service
Hydrographique
et Océanographique
de la Marine



2009

ANNALES HYDROGRAPHIQUES

TABLE DES MATIÈRES

Pages

Première partie

Apport des télémètres radar en hydrographie et évaluation de leurs performances, par l' <i>IETA R. LEROY</i>	1-1
Le système de management de la qualité du SHOM, par l' <i>ICETA H. DOLOU, B. BONDUELLE</i>	2-1
Recommandation nationale : levés au laser bathymétrique ; le projet Litto3D®, par l' <i>IPETA C. LE ROUX</i> .	3-1
Epuration surfacique adaptative des données bathymétriques multifaisceaux, par <i>N. DEBEZE</i>	4-1
De la classification des sédiments à la cartographie de la nature des fonds marins, par <i>T. GARLAN</i> ...	5-1

Deuxième partie

Mission océanographique du Pacifique - (août 2003 - août 2006), par l' <i>ICA J MEYRAT</i>	6-1
SHOM : un nouveau statut pour de nouvelles ambitions, par l' <i>IGA M. LE GOUIC</i>	7-1

PREMIÈRE PARTIE



APPORT DES TÉLÉMÈTRES RADAR EN HYDROGRAPHIE ET ÉVALUATION DE LEURS PERFORMANCES

par Ronan LEROY, ingénieur des études et techniques d'armement

RÉSUMÉ

Depuis quelques années, la technologie radar jouit d'un intérêt tout particulier dans le domaine de la mesure des hauteurs d'eau. En optant pour cette technologie au milieu des années 90 pour le maintien en condition opérationnelle de son réseau d'observatoires de marée, la France a été pionnière dans le domaine. Cet article présente les premiers résultats d'une décennie d'expérience. Les performances des télémètres radar ont été évaluées à l'aide du test de Van de Castele, qui s'est révélé être une méthode efficace et économique pour détecter les principaux défauts des installations et évaluer la qualité des données. L'expérience a montré jusqu'ici que les marégraphes à capteurs radar présentent des avantages intéressants au regard de leur facilité de mise en œuvre et, moyennant une installation correcte, leurs performances sont compatibles avec les exigences du programme GLOSS.

ABSTRACT

Radar technology has become of particular interest for sea level measurements for some years. France played a pioneer role in the middle of the 90's when it made the decision to adopt this technology to maintain its tide gauges network. This article reports on the experience and the lessons learned for about 10 years. Radar altimeter performances have been assessed against the Van de Castele test, which has appeared to be a very efficient methodology to detect the main installation flaws and to evaluate data quality. The experience gained shows that tide gauges fitted with radar sensors are more convenient in operation provided they are properly set up. Their performances are compliant with GLOSS requirements.

INTRODUCTION

L'observation du niveau de la mer est devenue un enjeu majeur aussi bien à l'échelle locale que régionale ou globale. A l'échelle locale, les objectifs concernent d'une façon générale l'aménagement du territoire côtier. Cela va du soutien des activités portuaires et de la sécurité de la navigation jusqu'à la détermination des niveaux de référence verticale pour la topographie et la bathymétrie (e.g. WÖPPELMANN et al., 2006). Les données de niveau marin sont également utilisées pour la mesure et la prédiction des surcotes, la validation des modèles de circulation et la calibration des altimètres satellitaires (NEREM and MITCHUM, 2001; CAZENAVE and NEREM, 2004). A l'échelle globale, l'étude du niveau des mers est cruciale pour comprendre les changements climatiques et leurs implications sur les populations concentrées près du littoral (e.g. CHURCH et al. 2001). De plus, la communauté scientifique s'est vue confier la mise en place d'un système d'alerte aux tsunamis dans l'océan Indien, la France jouant un rôle important dans ce dispositif (IOC, 2005; MERRIFIELD et al., 2005). La capacité à faire fonctionner les systèmes d'alerte multirisques est liée au développement de nouveaux senseurs capables d'effectuer des mesures exactes, précises et de façon continue. Dans ce contexte, la télémétrie par ondes électromagnétiques s'est rapidement avérée être une technologie efficace et relativement bon marché. Comme cela a été annoncé à la Commission Océanographique Internationale (IOC) en 2004, plusieurs pays (e.g. Grande Bretagne, Etats-Unis, Afrique du Sud, Espagne) envisagent ou ont déjà commencé l'équipement de leurs observatoires de marée par des télémètres radars.

Par conséquent, il est important que l'expérience acquise en la matière soit rapidement partagée. A cet égard, quelques précédents articles (KRANZ et al., 2001; WOODWORTH and SMITH, 2003 ; MARTIN MIGUEZ et al., 2005) ont déjà traité d'expériences de comparaison entre les marégraphes radar et ceux d'autres types. Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) fut un des premiers organismes dans le monde à appliquer cette technologie à son Réseau d'Observation du Niveau de la Mer (RONIM), le premier télémètre radar ayant été installé en 1998. Cet article fait le bilan des huit années d'expérience acquises par le SHOM dans ce domaine. L'objectif de cet article est d'apporter une vue d'ensemble incluant à la fois les aspects opérationnels et la qualité des données.

LE RÉSEAU RONIM

Au début des années 1990, le SHOM a entrepris la modernisation de son réseau de marégraphes (DUPUY and BATANY, 1992).

Cette entreprise a pris le nom de projet RONIM (Réseau d'Observation du Niveau de la Mer). RONIM est un réseau de stations marégraphiques implantées le long des côtes de France métropolitaine ainsi que dans les territoires d'outre-mer. Fin 2006, le réseau était composé de 25 marégraphes métropolitains (figure 1) et 5 stations outre-mer, respectivement à Nouméa (Nouvelle-Calédonie), Fort-de-France (Martinique), Pointe-à-Pitre (Guadeloupe), Ile-Royale (Guyane Française) et Pointe des Galets (La Réunion). L'installation de stations supplémentaires afin de densifier le réseau se poursuit.

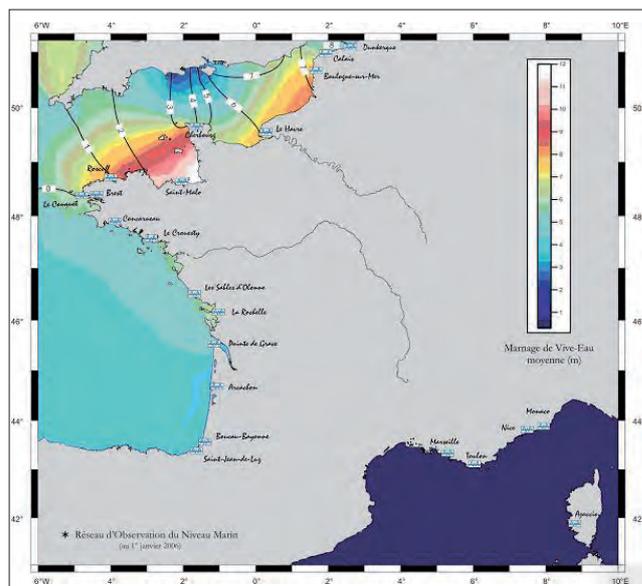


Figure 1 : Situation des observatoires de marée du réseau RONIM en France métropolitaine.

L'un des objectifs majeurs du projet RONIM est la satisfaction des besoins internationaux pour la surveillance du niveau de la mer. Cet objectif implique l'acquisition de données de hauteurs d'eau de très haute qualité et la mise à disposition de ces données à un niveau international.

Assurer la qualité des mesures de hauteurs d'eau n'est pas une tâche aisée : la performance des marégraphes doit être garantie pour des marnages extrêmes et dans des conditions météorologiques rigoureuses. Ce sont des conditions rencontrées par la plupart des marégraphes installés dans les ports de la Manche. Par ailleurs, les caractéristiques des stations varient selon l'infrastructure propre à chaque site. En dépit de ces difficultés, tous les observatoires ont été conçus pour remplir les exigences et standards français (SHOM, 2005) compatibles avec les recommandations du programme GLOSS (Global Sea Level Observing System) (IOC, 1997, 2002, 2006), rappelées ici :

- intervalle d'échantillonnage : moins d'une heure, typiquement 10 minutes
- période d'intégration : 2 ou 4 minutes
- exactitude de la mesure de niveau meilleure que 1 cm
- exactitude de la datation meilleure que 10 secondes
- mesures du niveau d'eau rapportées au zéro hydrographique, lui-même rapporté à une référence terrestre. Le rattachement géodésique entre le marégraphe et la référence locale doit être contrôlé avec une précision millimétrique tous les 5 ans.

Chaque marégraphe se compose d'une unité d'acquisition. Celle-ci reçoit le signal émis par le capteur et effectue son intégration sur une certaine durée (typiquement 2 minutes). Les données sont enregistrées toutes les 10 minutes sur une carte mémoire.

Chaque marégraphe est relié par liaison modem au centre de supervision basé au SHOM à Brest, qui récupère les données chaque semaine. L'unité d'acquisition peut en outre émettre sur la liaison modem des alarmes en cas de dysfonctionnement (mémoire pleine, dépassement d'un niveau extrême, coupure d'alimentation ...). L'opérateur du centre de supervision contrôle visuellement les séries temporelles et fait l'inventaire des défauts les plus flagrants pour les corriger par la suite.

Les données sont accessibles via le projet français Sonel (cf. www.sonel.org), projet dont la vocation est le contrôle et la diffusion en synergie de données des stations permanentes GPS et des observatoires français du niveau de la mer. Les données de hauteurs d'eau sont disponibles dans un délai d'une semaine pour les données brutes, et dans un délai de deux mois pour les données validées par le SHOM. Le SHOM fournit les moyennes mensuelles et annuelles au Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) (WOODWORTH and PLAYER, 2003). Le SHOM participe également à des programmes internationaux comme GLOSS (temps réel et différé), et plus récemment ESEAS (European Sea level Service), et des projets de mise en place de services opérationnels en temps réel tels que NOOS (North West Shelf Operational Oceanographic System) et SLEAC (Sea Levels along the European Atlantic Coastline).

Au niveau national, le projet Previmer lancé par le Pôle Mer Bretagne prévoit la mise en place d'un système d'océanographie opérationnelle capable de prédire les états de mer côtiers sur la façade métropolitaine. Le système comprendra notamment un outil de prévision des surcotes entièrement basé sur les observations du réseau RONIM, dans lequel toutes les fonctionnalités relatives au contrôle qualité des données développées par le SHOM (détection des anomalies ponctuelles, comparaison avec les prédictions de marée ...) seront automatisées. C'est pourquoi le réseau s'équipe depuis fin 2006 de liaisons temps réel.

A l'heure actuelle, le réseau RONIM est équipé de deux types de télémètres : les télémètres acoustiques et les télémètres radar, ces derniers supplantant progressivement les premiers.

Les télémètres acoustiques, qui équipent encore les marégraphes les plus anciens, sont basés sur le temps de trajet aller-retour dans l'air d'impulsions acoustiques se réfléchissant verticalement à la surface de l'eau. Les marégraphes acoustiques ont été mis en place en divers endroits pour l'observation du niveau de la mer (IOC, 2002). Leurs inconvénients sont bien connus et mis en évidence à travers plusieurs études (HUNTER, 2003; IOC, 2004), leur principal défaut étant leur haute sensibilité aux gradients de température entre le transducteur et la surface de l'eau. Ce défaut est même sensible en Méditerranée, où les marégraphes sont pourtant faibles (GONELLA and SIMON, 2002).

La veille technologique menée par le SHOM l'a conduit à remplacer progressivement les capteurs acoustiques par des télémètres radar. Le premier d'entre eux fut installé au Havre en octobre 1998. A l'heure actuelle, la majorité des marégraphes sont équipés de ces télémètres (20 sur 30). Nous allons nous intéresser à ce type de capteur, dont l'utilisation en marégraphie à travers le monde devrait vraisemblablement se généraliser (IOC, 2005).

Les télémètres radar utilisés au SHOM pour mesurer les hauteurs d'eau sont basés sur le principe du FMCW : Frequency Modulated Continuous Wave. Ce principe repose sur la variation linéaire de la fréquence d'un signal électromagnétique entre 8,5 et 9,5 GHz. Emis à une fréquence f_1 à l'instant t_1 , le signal est rétrodiffusé par la surface de l'eau et est reçu par l'antenne du capteur à un instant t_2 , à la même fréquence f_1 (pas d'effet Doppler, le plan d'eau est fixe). Entre l'instant t_1 et l'instant t_2 , la fréquence d'émission du signal généré par le capteur augmente linéairement (balayage fréquence). A l'instant t_2 , la fréquence du signal généré est f_2 . La différence de fréquence $f_2 - f_1$ est directement proportionnelle au temps de trajet aller-retour du signal, donc à

la distance entre la surface de l'eau et l'antenne. Cette différence de fréquence est transformée en spectre de fréquence via une transformation de Fourier rapide (FFT) et la distance est calculée à partir du spectre.

Deux types de télémètres radar sont utilisés au SHOM : le BM70 et le BM100 de la société Krohne (www.krohne.com). Le premier émet un train d'impulsions électromagnétiques dans l'air grâce à une antenne d'émission alors que le deuxième émet ce même train d'impulsions le long d'un câble spécial : le lobe principal du signal radar est guidé le long du câble, ce qui permet de détecter avec une grande précision l'interface air-eau.

Suivant les premières expériences et les conseils du fabricant, les marégraphes radar sont mis en œuvre dans une infrastructure comprenant un abri pour le capteur, afin de les protéger contre les agressions de l'environnement, et d'un dispositif de tranquillisation (tube ou puits) afin de stabiliser la surface de l'eau.

Comme nous allons le voir, plusieurs types d'association télémètre/infrastructure ont été testés (tubes de différents matériaux et dimensions, puits de tranquillisation).

LE TEST DE VAN DE CASTEELE

L'engagement du SHOM à assurer la qualité des mesures marégraphiques conduit ses spécialistes à visiter les observatoires régulièrement (sur une base annuelle) afin de contrôler leurs performances. Ces contrôles in situ sont essentiels car les tests en laboratoire ne prennent pas en compte l'effet des conditions environnementales sur les équipements.

Des tests de Van de Castele (VDC) ont été effectués au cours de ces visites, en plus des opérations de nivellement et de maintenance. Ce type de test a été inventé par l'ingénieur Charles de Van de Castele (1903-1977) en 1962. A l'origine conçu pour évaluer les performances des marégraphes mécaniques à flotteurs, GLOSS a recommandé son application pour contrôler tous les types de marégraphes (IOC, 1985) mais à notre connaissance, son utilisation n'avait pas, jusqu'ici, été étendue aux marégraphes modernes.

Le test de Van de Castele consiste à comparer, sur un cycle de marée complet, les mesures à l'aide d'un instrument de mesure directe (échelle de marée, sonde lumineuse) et celles d'un marégraphe. Les résultats sont portés sur un graphe représentant le niveau de la mer en abscisse et les écarts en ordonnées. La sonde manuelle lumineuse étant utilisée comme référence, on considère implicitement qu'elle fournit des mesures plus exactes que l'instrument à tester. La sonde utilisée lors des tests était une sonde lumineuse d'OTT dont la précision varie entre 4 mm (pour des mesures de 3 m) à 12 mm (pour des mesures de 12 m), selon les étalonnages en laboratoire effectués (LE ROY, 2006). Evidemment, les résultats dépendent dans une large mesure des facultés de mesure de l'opérateur, par conséquent les erreurs humaines doivent être prises en compte.

Si la sonde et le marégraphe étaient tous les deux parfaits, les différences entre leurs mesures demeureraient constantes et égales à zéro. On obtiendrait un trait vertical sur le diagramme de VDC. Ce n'est généralement pas le cas, et la forme de la courbe de VDC permet d'identifier les défauts associés à chaque marégraphe, indépendamment de son origine : erreur de calage vertical, erreurs instrumentales, inadéquation de l'installation, etc. (LENNON, 1968; IOC, 1985).

RÉSULTATS

Entre 2002 et 2005, plusieurs tests de Van De Castele ont été effectués sur un certain nombre d'observatoires équipés de télémètres radars. La plupart des tests étaient effectués en vive-eau, durant un cycle de marée complet, à raison d'une mesure simultanée toutes les 5 ou 10 minutes. La période d'intégration des marégraphes était réduite à 10 secondes pour une meilleure correspondance avec les mesures faites à la sonde. Les résultats d'une sélection de ces tests in situ sont présentés plus loin (tableau 1). Ces tests ont permis d'évaluer la qualité des mesures par télémétrie radar ainsi que d'optimiser l'architecture des observatoires pour convenir aux nouveaux senseurs.

Le diagramme de VDC est établi en portant, sur l'axe des ordonnées, les hauteurs du niveau de la mer P mesurées par la sonde (hauteurs corrigées des paramètres d'étalonnage déterminés en laboratoire), et sur l'axe des abscisses, les écarts entre les lectures à la sonde et les mesures du marégraphe (P-R). Nous calculerons aussi l'écart-type des séries temporelles P-R afin d'avoir un estimateur des erreurs des mesures du radar.

TÉLÉMÈTRE RADAR INSTALLÉ DANS UN TUBE EN PVC

Le marégraphe de La Rochelle est un des premiers à avoir été équipé d'un capteur radar.

Le capteur était installé dans une structure protectrice, un tube en PVC de 30 cm de diamètre fixé verticalement au quai (figure 2). Les résultats du test de Van de Castele



Figure 2 : Télémètre radar BM 70A installé dans un tube en PVC de 30 cm de diamètre et fixé au quai par des anneaux métalliques.

effectués pendant la visite de maintenance du marégraphe sont représentés sur la figure 3. Un systématisme apparaît nettement avec des maxima positifs d'écarts à 1, 2, 3, 4, 5 et 6 mètres, et des écarts minima au milieu de chaque intervalle entre ces valeurs. Les hauteurs correspondant aux écarts maxima se sont révélés coïncider exactement avec l'emplacement des anneaux de fixation du tube sur le quai.

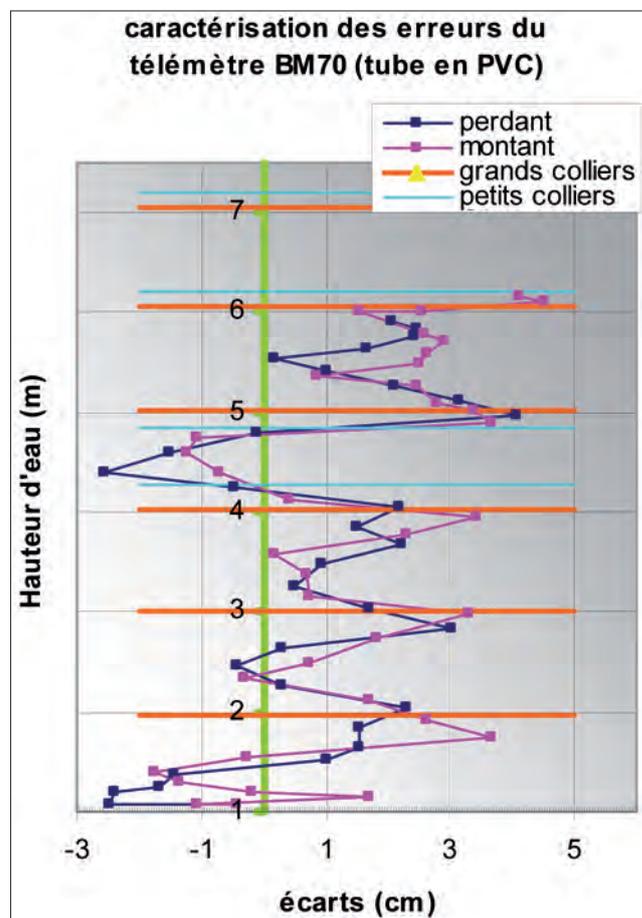


Figure 3 : Résultats du test de Van de Castele effectué pour l'observatoire de marée de La Rochelle. Les hauteurs d'eau mesurées à la sonde lumineuse sont en ordonnées (P, en cm), les différences entre les mesures radar et les lectures à la sonde sont portées en abscisse (P-R, en cm).

Le PVC est un matériau qui n'a en principe pas d'effet sur la propagation du signal électromagnétique. En revanche, les anneaux métalliques peuvent constituer des obstacles réfléchissants interférant avec le signal réfléchi par la surface de l'eau.

Lieu	Type d'installation	Marnage	Etat de mer	RMS sonde-radar
La Rochelle	Tube en PVC	5 m	Clapot de 5 cm	1,8
Saint-Malo	Tube en acier inox	12 m	Clapot de 20 à 30 cm	1,1
Brest	Puits de tranquillisation	7 m	Clapot nul	0,6
Roscoff	Puits de tranquillisation	8 m	Clapot de 30 cm	2,3

Tableau 1 : Principales caractéristiques des tests de Van de Castele mentionnés dans le texte.

Les résultats du test de VDC peuvent aussi être utilisés pour évaluer la qualité des données et en particulier pour savoir si elles satisfont l'exigence de précision centimétrique, qui est une des exigences fortes de GLOSS (IOC 1997, 2002). Pour cela, nous admettons que les erreurs de la sonde (E_p) et les erreurs dues au capteur radar (E_r) suivent une distribution aléatoire gaussienne. A partir de cette affirmation, le RMS des différences entre les deux séries de mesures s'expriment comme suit :

$$RMS_{P-R} = \sqrt{E_p^2 - E_r^2}$$

RMS_{P-R} est dans ce cas égal à 1,8 cm.

L'écart-type des erreurs à la sonde lumineuse a été estimé à 1,5 cm, en raison d'un clapot relativement important lors des mesures.

On en déduit l'erreur sur les mesures du télémètre radar

$$E_r = \sqrt{RMS_{P-R}^2 - E_p^2} = \sqrt{1,8^2 - 1,5^2} = 1 \text{ cm}$$

On obtient ainsi une estimation de l'erreur des mesures par télémètres radar.

Si les résultats sont largement satisfaisants pour la plupart des applications, l'erreur estimée atteint la limite des recommandations internationales. Une telle erreur peut affecter l'estimation du niveau moyen de la mer sur le long terme. Une comparaison sur une vingtaine de jours avec un marégraphe à capteur de pression a confirmé les résultats de VDC et des corrections ont été introduites dans l'appareil selon une procédure développée par le fabricant.

RADAR INSTALLÉ DANS UN TUBE EN ACIER INOXYDABLE

Tirant parti des résultats précédents et en vue de mesurer des marnages plus importants, un nouveau type d'infrastructure a été étudié. L'observatoire de Saint-Malo, où le marnage de vive-eau moyenne est de 12 m, est ainsi constitué d'un télémètre BM70A émettant dans un tube en acier inoxydable de 16 mètres de long et de 9 centimètres de diamètre. Un autre tube de même diamètre mais en PVC, est installé à proximité (figure 4). Ce tube est destiné à faciliter les lectures à la sonde lumineuse.

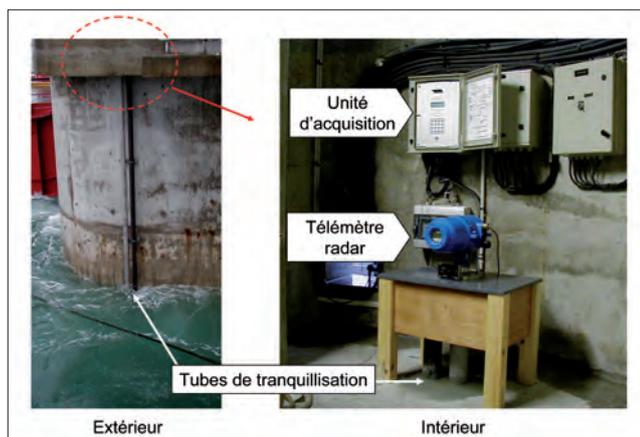


Figure 4 : Télémètre radar BM 70A installé dans un tube en acier de 9 cm de diamètre. Le tube en PVC situé à côté est utilisé pour effectuer les lectures à la sonde.

En principe, le tube en acier inoxydable n'altère pas la propagation des micro-ondes, en revanche son principal inconvénient est son coût élevé.

Comme nous le voyons sur la figure 5, la courbe P-R se distribue aléatoirement sur tout le marnage, ce qui confirme que le tube n'a aucun effet sur le signal. Il montre cependant, que l'écart P-R s'accroît légèrement à mesure que l'on s'approche de la basse mer. Cet accroissement peut avoir plusieurs causes :

- un défaut du télémètre : des problèmes d'atténuation du signal ont été rencontrés lors de la mise en œuvre de l'instrument par le SHOM et la société Krohne, en raison du marnage extrêmement important de la marée de Saint-Malo, ce marnage obligeant à mesurer des tirants d'air jusqu'à 16 m ;
- une éventuelle imprécision de la sonde lumineuse (rappelons que l'étalonnage de la sonde lumineuse ne prenait pas en compte les éventuels défauts liés à la dilatation thermique, or la température atmosphérique était de l'ordre de 10 degrés lors de l'expérience) ;
- des erreurs systématiques lors de la lecture à la sonde lumineuse.

En dépit de ce défaut, les résultats globaux sont impressionnants. Le RMS des écarts est de 1,1 cm. On en déduit un RMS des erreurs du télémètre de 0,5 cm (le RMS des erreurs sur les mesures à la sonde lumineuse ayant été estimé à 1 cm).

Un tel observatoire satisfait pleinement aux recommandations de GLOSS.

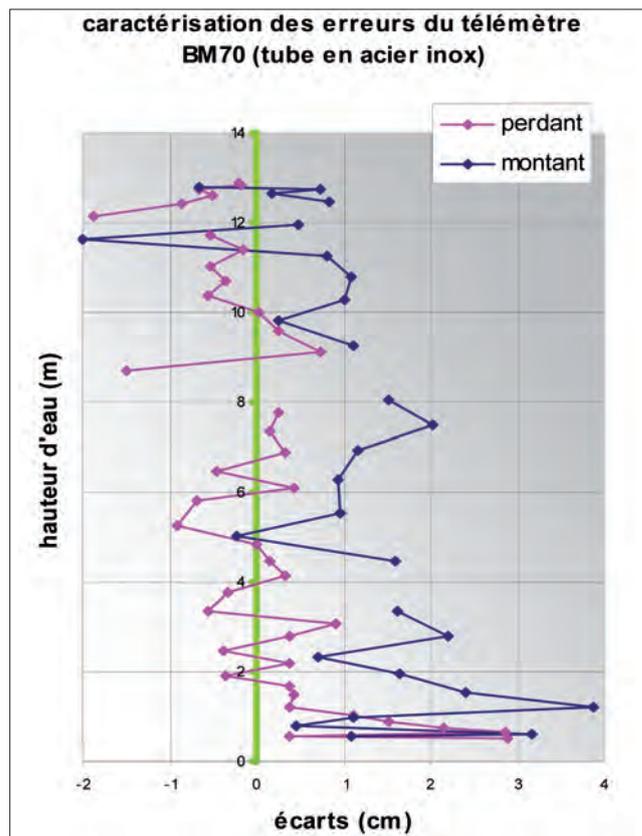


Figure 5 : Résultats du test de Van de Castele pour l'observatoire de marée de Saint Malo. Les hauteurs d'eau mesurées à la sonde lumineuse sont en ordonnées (P, en cm), les différences entre les mesures radar et les lectures à la sonde sont portées en abscisse (P-R, en cm).

RADAR INSTALLÉ DANS UN Puits DE TRANQUILLISATION

L'observatoire du niveau de la mer de Brest est le plus ancien de France et sans doute au monde (WÖPPELMANN et al., 2006a). Plusieurs types de marégraphes s'y sont succédés depuis le début du 19^e siècle. Depuis quelques années, les mesures de hauteur d'eau à Brest sont assurées par le BM100A, qui opère dans le puits de tranquillisation de l'observatoire (Figure 6), de 2 mètres de diamètre.

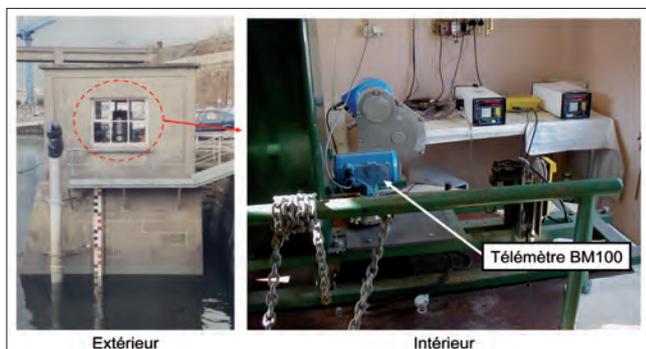


Figure 6 : Marégraphe installé au sommet d'un puits de tranquillisation.

Le diagramme de VDC est représenté figure 7. Le RMS-P-R est de 0,6 cm, ce qui donne, selon l'équation 2 un RMS des erreurs du télémètre de 0,3 cm. Malgré les erreurs systéma-

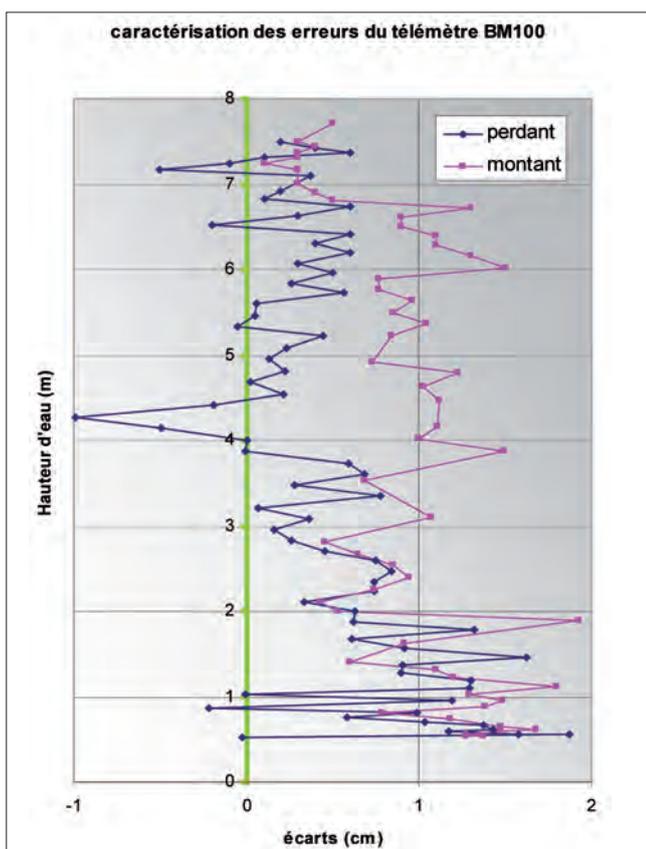


Figure 7 : Résultats du test de Van de Castelee pour l'observatoire de marée de Brest. Les hauteurs d'eau mesurées à la sonde lumineuse sont en ordonnées (P, en cm), les différences entre les mesures radar et les lectures à la sonde sont portées en abscisse (P-R, en cm).

tiques que montre la courbe (défaut de calage du zéro, augmentation de P-R à l'approche des basses mers), un tel marégraphe remplit largement les exigences de précision centimétrique de GLOSS.

Un autre test de Van de Castelee a été effectué dans l'observatoire de marée de Roscoff. Les résultats sont présentés sur la figure 8. L'installation consiste en un télémètre radar BM100 placé au sommet d'un puits de tranquillisation similaire à celui de Brest. Mais ici, les écarts entre les lectures à la sonde et les mesures du télémètre sont plus importantes (RMS = 2,3 cm), ce qui laisse penser à première vue une incompatibilité avec les exigences qualité de GLOSS. Mais en y regardant de plus près, on remarque que la droite de régression est parfaitement droite et centrée. La grande dispersion des écarts individuels est à imputer aux lectures à la sonde lumineuse, fortement bruitées par deux facteurs : un état de surface de l'eau médiocre dans le puits de tranquillisation (présence de corps gras) rendant la mesure difficile, et une météo agitée ce jour-là, avec des vagues non complètement filtrées dans le puits (à Brest, un état de mer calme prévalait, cf. tableau 1). Ce facteur met en évidence les limites des applications liées au test de Van de Castelee, puisque l'hypothèse selon laquelle la référence des mesures (la sonde lumineuse) mérite une plus grande confiance que le capteur testé devient irréaliste dans certaines conditions.

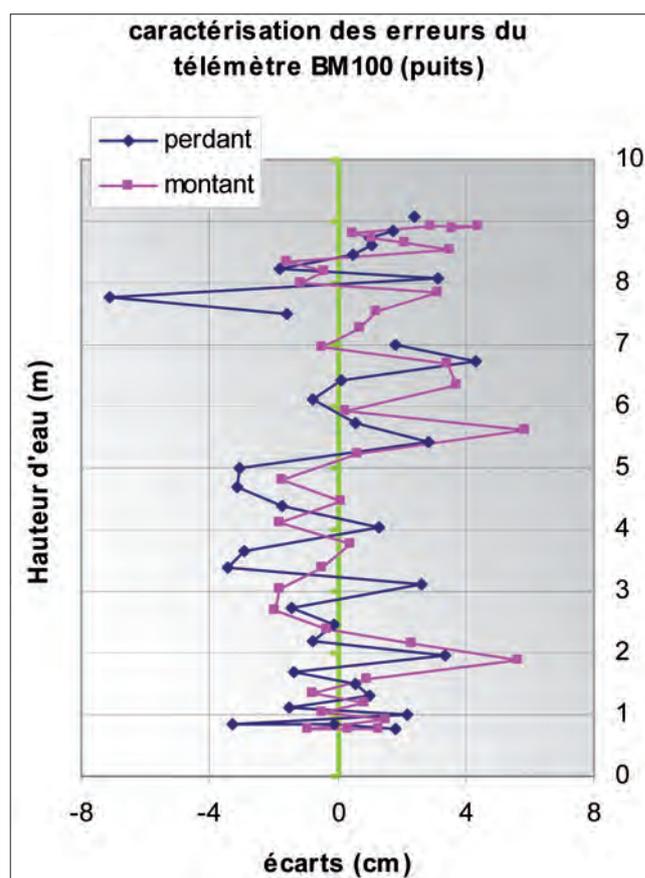


Figure 8 : Résultats du test de Van de Castelee pour l'observatoire de marée de Roscoff. Les hauteurs d'eau mesurées à la sonde lumineuse sont en ordonnées (P, en cm), les différences entre les mesures radar et les lectures à la sonde sont portées en abscisse (P-R, en cm).

CONCLUSION ET DISCUSSION

L'observation du niveau de la mer nécessite des instruments de mesure dont la précision et la fidélité dans le temps puissent être démontrées. Les recommandations de GLOSS stipulent qu'un recouvrement d'au moins un an est nécessaire (IOC, 1994), afin de disposer de suffisamment de données pour faire une comparaison entre l'ancienne technologie, déjà éprouvée et qualifiée, et la nouvelle. Cependant, le marégraphe parfait n'existe pas (encore !), et lorsque l'on compare deux instruments, il y a toujours une incertitude quant à celui qui est le plus digne de confiance. D'un autre côté, mener des intercomparaisons sur le long terme, quoique vivement souhaité, n'est pas toujours réalisable pour des raisons financières ou logistiques. En réalité, seul l'observatoire de Brest fait fonctionner deux types de capteurs, l'un acoustique, l'autre électromagnétique (Krohne BM100), depuis février 2004. Les analyses comparatives effectuées jusqu'ici font apparaître des erreurs systématiques périodiques. L'analyse harmonique des écarts entre le télémètre radar et acoustique fait clairement apparaître des harmoniques semi-diurnes (chaque marée basse suscite un gradient de température important dans le puits et une erreur associée du télémètre acoustique), diurnes (corrélées avec les variations journalières de température), saisonnières et annuelles. L'amplitude du signal annuel atteint ainsi 3 cm, et des pics de 5 à 10 cm sont observables en période de vive-eau. Les comparaisons effectuées jusqu'ici soulignent la difficulté à corriger les effets de la température ambiante le long du trajet acoustique (DEVAUCHELLE, 2002, GONELLA and SIMON, 2002; HUNTER, 2003; IOC, 2004).

Au contraire, l'expérience menée sur la base de tests de Van de Casteele s'est révélée être une option rentable et efficace pour évaluer simplement les performances des marégraphes et en particulier des nouveaux capteurs radar du réseau RONIM. En premier lieu, ce test permet d'estimer correctement la qualité des mesures du niveau marin sous réserve de disposer de conditions de mesure correctes (état de mer calme notamment) et de pouvoir qualifier les performances de l'instrument étalon utilisé. Les résultats ont permis de vérifier que les marégraphes radar respectent les exigences du programme GLOSS (IOC, 1997, 2002, 2006). Les visites périodiques des marégraphes et les contrôles répétés ne montrent pas de dérive significative des capteurs, qui n'ont pas nécessité de nouvelle calibration jusqu'ici. Les capteurs radars s'avèrent également suffisamment robustes et peu sensibles aux conditions extérieures. En principe, les mesures ponctuelles aberrantes sont aisément filtrées grâce à un taux d'échantillonnage à haute fréquence des mesures. Cela signifie que la structure protectrice n'est a priori pas obligatoire. Cependant, le dispositif de tranquillisation évite les perturbations de mesure comme l'arrivée d'objets au droit du marégraphe. De plus, le contrôle des performances du marégraphe au moyen du test de Van de Casteele est facilité si les tests sont effectués à l'intérieur du tube. Les inconvénients classiques des tubes (Lennon, 1993) et leurs interactions avec le signal radar ont peu être évités grâce à l'emploi de matériaux et dimensions appropriés.

OUVRAGES CITÉS

- BRUMBI, D., 2003. Fundamentals of Radar Technology for Level Gauging. KROHNE Messtechnik GmbH & Co. KG [Online]. Available from: http://www.krohne.com/html/dlc/HB_LEVELRADAR_e_72.pdf, [cited 11 October 2006].
- CAZENAVE, A. and NEREM, R.S., 2004. Present-Day Sea Level Change: Observations and Causes. *Reviews of Geophysics*, 42, RG3001, 1-20.
- CHURCH, J.; GREGORY, J.A.; HUYBRECHTS, P.; KUHN, M.; LAMBECK, K.; NHUAN, M.T.; QIN, D., and WOODWORTH, P.L., 2001. Changes in sea level. In HOUGHTON, J.T.; DING, Y.; GRIGGS, D.J.; NOGUER, M.; VAN DER LINDEN, P.J.; DAI, X.; MASKELL, K., and JOHNSON, C.A., (ed.). *Climate change 2001: the scientific basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press, pp. 639-693.
- DEVAUCHELLE, O., 2002. Rapport d'étude n°005/02 de septembre 2002 par Olivier Devauchelle : mesure du gradient de température dans le puits du marégraphe de Penfeld (Brest).
- DUPUY, P-Y. and BATANY, C., 1992. Evaluation d'un marégraphe côtier à ultrasons. SHOM, Rapport d'étude No. 005/92.
- GONELLA, J. and SIMON, B., 2002. Erreur induite par l'évolution diurne de la température sur deux marégraphes acoustiques en Méditerranée. SHOM, Rapport d'étude No. 002/02.
- HUNTER, J.R., 2003. On the Temperature Correction of the Aquatrak Acoustic Tide Gauge. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20, 1230-1235.
- IOC, 1985. *Manual on Sea-Level Measurement and Interpretation. Volume 1- Basic procedures*. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals & Guides No. 14, IOC, Paris, 83p.
- IOC, 1994. *Manual on Sea-Level Measurement and Interpretation. Volume 2- Emerging Technologies*. Intergovernmental Oceanographic Commission, Technical Series, No. 14, IOC, Paris, 72p.
- IOC, 1997. *Global Sea Level Observing System (GLOSS) implementation plan 1997*. Intergovernmental Oceanographic Commission, Technical Series, No. 50, 91p.
- IOC, 2002. *Manual on Sea-Level Measurement and Interpretation. Volume 3- Reappraisals and Recommendations as of the Year 2000*. Intergovernmental Oceanographic Commission Manuals and Guides, No. 14, 47p&Appendices.

IOC, 2004. Workshop on New Technical Developments in Sea and Land Level Observing Systems [Online]. Workshop Report, No. 193. Available from : <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001377/137705e.pdf> [cited 11 October 2006].

IOC, 2005. Global Sea Level Observing System (GLOSS) – The Group of Experts on the Global Sea Level Observing System (GLOSS) [online]. IOC/GEGLOSS- IX/3. Ninth Session. Paris, France 24-25 February 2005. Available from: <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001400/140083e.pdf> [cited 11 October 2006].

IOC, 2006. Manual on Sea-Level Measurement and Interpretation. Volume 4-An update to 2006. Intergovernmental Oceanographic Commission Manuals and Guides, No. 14, 80 pp.

KRANZ, S.; ZENZ, T., and BARJENBRUCH, U., 2001. Radar: Is it a New Technology Applicable to Water Level Gauging? *Physics and Chemistry of the Earth (C)*, 26 (10-12), 751-754.

KROHNE, 2000. Installation and Operating instructions (Reference Manual). Level Radar BM 70 A/ BM 70 P. Non-contact level gauging using electromagnetic waves [online]. Available from: http://www.krohne.com/html/dlc/MA_BM70AP_e_72.pdf [cited 11 October 2006].

KROHNE, 2004. Installation and Operating instructions. BM 100 A Reflex-Radar [online]. Available from: http://www.krohne.com/html/dlc/HB_BM100A_e_72.pdf [cited 11 October 2006].

LE ROY, R., 2006. Evaluation des performances des telemetres radar pour la mesure des hauteurs d'eau. SHOM, Rapport d'étude No 001/06.

LENNON, G.W., 1968. The Evaluation of Tide Gauge Performance through the Van de Casteele Test. *Cahiers Océanographiques*, 20, 867-877.

LENNON, G.W., 1993. The stilling well: a help or a Hindrance? Joint IAPSO-IOC workshop on sea level measurements and quality control. IOC Workshop Report No. 54, pp. 52-64.

MARTIN MIGUEZ, B.; PEREZ GOMEZ, B., and ALVAREZ FANJUL, E., 2005. The ESEAS-RI Sea Level Test Station: Reliability and Accuracy of Different Tide Gauges. *International Hydrographic Review*, 6(1), 44-53.

MERRIFIELD, M.A. et al., 2005. Tide gauge observations of the Indian Ocean tsunami, December 26, 2004. *Geophysical Research Letters*, 32, L09603, doi:10.1029/2005GL022610.

NEREM, R.S. and MITCHUM, G., 2001. Sea level change. In FU, L.L. and CAZENAVE, A. (ed.), *Satellite altimetry and earth sciences*, Academic Press, San Diego, pp. 329-349.

SHOM, 2005. NRC2005-009 Norme du SHOM sur la mesure des hauteurs d'eau.

WOODWORTH, P.L. and PLAYER, R., 2003. The Permanent Service for Mean Sea Level: an update to the 21st century. *Journal of Coastal Research*, 19, pp. 287-295.

WOODWORTH, P.L. and SMITH, D.E., 2003. A One Year Comparison of Radar and Bubbler Tide Gauges at Liverpool. *International Hydrographic Review*, 4(3), 2-9.

WÖPPELMANN, G.; POUVREAU, N., and SIMON, B., 2006a. Brest sea level record: a time series construction back to the early 18th century. *Ocean Dynamics*, doi:10.1007/s10236-005-0044-z.

WÖPPELMANN, G.; ZERBINI, S., and MARCOS, M., 2006b. Tide gauges and Geodesy: a secular synergy illustrated by three present-day case studies. *Comptes Rendus Geoscience, Thematic issue on Earth observation from space*, doi:10.1016/j.crte.2006.07.006.

LE SYSTÈME DE MANAGEMENT DE LA QUALITÉ DU SHOM

par Henri DOLOU, ingénieur en chef des études et techniques d'armement et
Bénédicte BONDUELLE, ingénieur sur contrat

RÉSUMÉ

L'organisation du SHOM repose sur une distribution de son personnel décrite dans un organigramme et une répartition des activités s'appuyant sur un plan stratégique et un système de management basé sur le référentiel qualité ISO 9001.

Constitué à partir d'une vision stratégique, un plan stratégique a été mis en place pour remplir les missions qui sont dévolues au SHOM (voir article de Michel Le Gouic en deuxième partie : « SHOM : un nouveau statut pour de nouvelles ambitions »).

Des objectifs stratégiques sont définis et déclinés en projets recouvrant l'ensemble des activités du SHOM.

Le système de management s'appuie sur la norme ISO 9001 : 2000, système de management de la qualité (SMQ) qui vise à accroître la satisfaction des clients du SHOM. Le SMQ du SHOM est certifié.

Conformément à la norme ISO 9001 : 2000, la documentation du SMQ comprend un manuel qualité reproduit ici in extenso.

ABSTRACT

SHOM organization is based on employees distribution, as illustrated in its organisational chart, and a distribution of its activities supported by a strategic plan and a quality management system which requirements are those of ISO 9001:2000 standards.

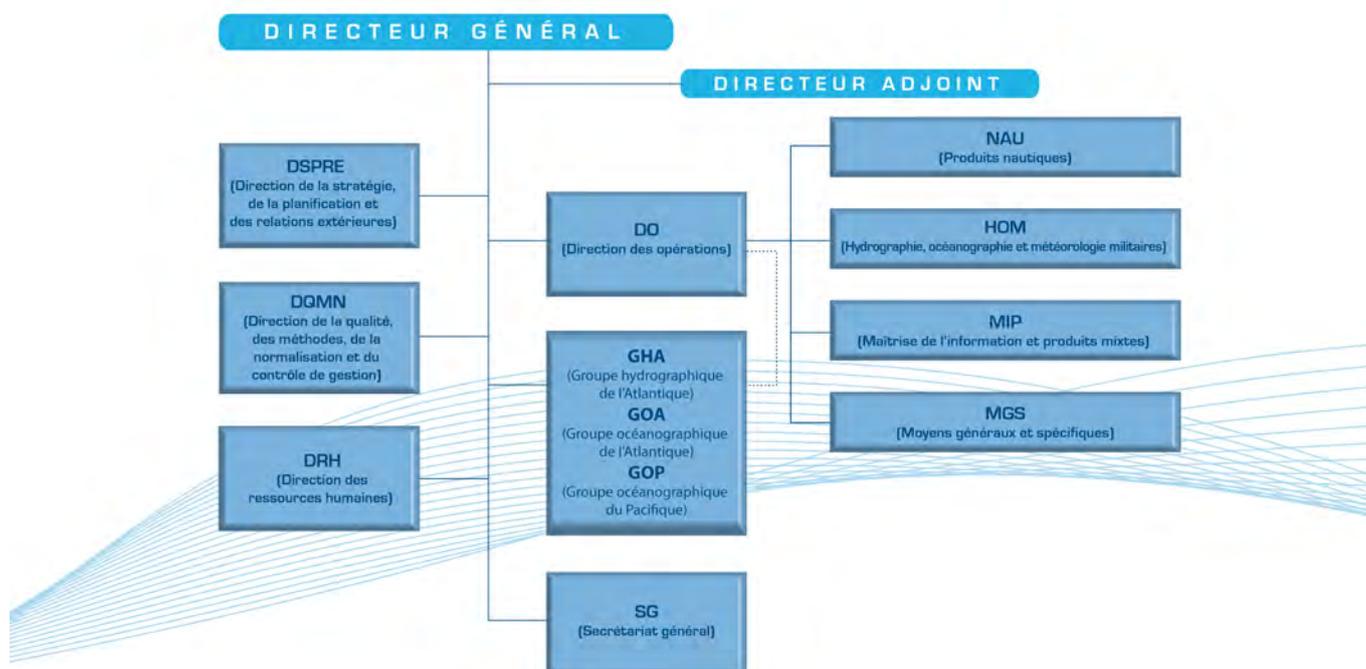
Based on a strategic vision, a strategic plan has been set up to fulfil SHOM missions requirements (see Michel Le Gouic's article in second part: « SHOM : un nouveau statut pour de nouvelles ambitions »).

Strategic objectives are set and come in projects dealing with SHOM activities.

The quality management system is based on ISO 9001:2000 standards which objectives are to enhance customer satisfaction.

The SHOM quality management system is certified.

In accordance with ISO 9001:2000 standards, the documentation of SHOM quality management system includes a quality manual reproduced here in extenso.



HISTORIQUE

Soucieux de développer leurs marines militaires et marchandes pour défendre leurs intérêts économiques et stratégiques, les Etats prirent conscience de la nécessité de disposer librement de documents nautiques de qualité, nécessitant des opérations de levés hydrographiques systématiques. Dès sa création en **1720**, le service hydrographique français a été conçu comme un instrument, à la fois militaire et civil, de l'exercice de la souveraineté de l'Etat en mer. Ces activités d'hydrographie et de cartographie marine s'inscrivent aujourd'hui dans le cadre général de l'action de l'Etat en mer et des obligations internationales de la France (convention internationale pour la sauvegarde de la vie humaine en mer [Solus], convention des Nations unies sur le droit de la mer).

Le développement progressif des activités à finalité militaire (océanographie militaire) a été consacré en **1971** par le changement d'appellation du service central hydrographique qui est alors devenu service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM). L'intégration dans un organisme unique d'activités présentant une grande synergie naturelle (connaissances scientifiques, méthodes et moyens d'exploitation et de recueil de données...) offre en effet l'avantage d'une grande souplesse d'emploi de moyens et de personnel relativement polyvalents. Elle permet ainsi de faire face de manière économique à des besoins considérables et critiques pour le succès des opérations militaires.

En **2007**, le SHOM voit ses missions étendues au soutien des politiques publiques maritimes et devient un établissement public de l'Etat, placé sous la tutelle du ministre de la défense.

DOMAINE D'APPLICATION DU SYSTÈME DE MANAGEMENT DE LA QUALITÉ

Le système de management de la qualité (SMQ) répond à l'ensemble des exigences de la norme ISO 9001:2000 et s'applique à toutes les activités du SHOM :

- recueil des données décrivant l'environnement physique marin, incluant les informations nautiques,
- élaboration et diffusion d'informations et de publications nautiques répondant aux besoins de la sécurité de la navigation maritime et des usagers du domaine maritime,
- élaboration et diffusion de produits HOM (hydrographiques, océanographiques, météorologiques) en soutien aux missions de défense,
- pilotage de la recherche et du développement, actions de formation spécifiques et prestations d'expertise dans les domaines afférents.

LA POLITIQUE QUALITÉ ET LES OBJECTIFS GÉNÉRAUX

Le SHOM, **établissement public de l'Etat**, a pour mission de connaître et de décrire l'**environnement physique marin** dans ses relations avec l'atmosphère, avec les fonds marins et les zones littorales et d'en prévoir l'évolution. A ce titre :
- il exerce les attributions de l'Etat en matière d'**hydrographie nationale**,

- il est responsable, dans ses domaines de compétence, de la satisfaction des besoins d'expertise, d'évaluation des capacités futures et de **soutien opérationnel de la défense**,
- il participe à la satisfaction des besoins en matière d'action de l'Etat en mer et sur le littoral, en **soutien des politiques publiques maritimes**.

Son ambition est de garantir la **qualité** et la **disponibilité de l'information** décrivant l'environnement physique marin en coordonnant son recueil, son archivage et sa diffusion, pour **satisfaire au moindre coût les besoins publics**, militaires et civils. Cette ambition s'appuie sur une politique qualité, cohérente avec celles de sa tutelle et de ses partenaires et avec les recommandations de l'Organisation hydrographique internationale. Cette politique qualité fixe l'engagement du SHOM de répondre au mieux aux besoins des utilisateurs de ses produits et services, qu'il s'agisse des services de l'Etat, des collectivités territoriales, des entreprises ou des simples usagers de la mer.

Les orientations stratégiques du SHOM sont fixées dans le plan stratégique. La vision à long terme est décrite pour les principaux domaines d'activité dans des « objectifs stratégiques » approuvés par le conseil d'administration. Ces objectifs sont eux-mêmes déclinés en projets pour toute l'activité finalisable et en activités à flux pour les productions à caractère continu ; les indicateurs qui en résultent sont la base du tableau de bord de l'établissement.

La politique qualité du SHOM suppose une recherche permanente d'**excellence** et de **progrès** bien inscrite dans la culture de l'établissement, basée sur des **valeurs séculaires** : l'approche scientifique, la rigueur et les méthodes de contrôle, sans oublier le sens marin et l'esprit d'équipe qui les accompagnent.

Elle est mise en œuvre à travers un « système de management de la qualité » (SMQ) répondant aux exigences de la norme ISO 9001 sur l'ensemble des activités du SHOM ; ce SMQ est appelé à évoluer à plus long terme vers un système de management intégré prenant en compte notamment les exigences de protection de l'environnement.

La démarche qualité du SHOM doit lui permettre de se maintenir dans les meilleures organisations de taille comparable au plan mondial en ce qui concerne la sécurité (au sens sûreté de fonctionnement, « safety » en anglais) des produits diffusés, tout en s'assurant de la cohérence entre les objectifs visés et les ressources disponibles ou prévisibles et en veillant à garantir en priorité la sécurité des navigateurs.

Les objectifs généraux de la politique qualité du SHOM sont les suivants :

- **satisfaction des usagers** (au sens du comité consultatif des utilisateurs des documents, levés et prestations du SHOM) ;
- **sûreté de fonctionnement** des produits du SHOM ;
- **maîtrise de la conception, du développement, de la réalisation et de l'utilisation** des systèmes, en termes de performances, de coût et de délais ;
- **respect des normes** internationales et nationales, **participation à leur élaboration** ;
- **traçabilité** des données, de l'acquisition à la diffusion en passant par le traitement ;

- **efficacité**, mesurée par le niveau de réalisation des activités planifiées et d'obtention des résultats escomptés,
- **efficience**, visant à améliorer les relations clients/fournisseurs internes et le fonctionnement des services pour mieux utiliser les ressources tout en prenant en compte les aspirations des agents du SHOM.

Ils sont déclinés au niveau des projets et des processus, notamment par des objectifs d'amélioration.

Je m'engage à faire appliquer cette politique qualité dans le souci permanent de l'amélioration continue des performances et de l'efficience du SHOM et de la motivation et de l'adhésion de son personnel, éléments essentiels de la réussite de la démarche qualité.

L'ingénieur général de l'armement Gilles Bessero
 directeur général du SHOM
 Signé : Gilles Bessero

LE RÉFÉRENTIEL DOCUMENTAIRE DU SHOM

Les règles de maîtrise des documents du système documentaire du SHOM sont décrites dans la procédure "**Maîtrise des documents**". Ces règles recouvrent l'identification, l'élaboration, la présentation, l'approbation, l'accessibilité, la révision, le stockage, la protection, la conservation, l'élimination des documents et le traitement des documents classifiés (confidentiel défense ou plus).

Cette procédure s'appuie sur l'utilisation d'un outil informatique appelé communément "référentiel documentaire". Tout utilisateur accédant au "référentiel documentaire", exclusivement à travers les sites intranet ou Internet du SHOM, doit s'identifier en fournissant son identifiant et son mot de passe personnels.

La sauvegarde de la base de données "référentiel documentaire" se fait conformément à la procédure en vigueur pour les bases de données du SHOM.

Le principe de gestion – cycle de vie – d'un document est le suivant :

L'AMÉLIORATION CONTINUE

Au SHOM, l'amélioration continue est mise en œuvre et suivie à tous les niveaux pour tracer toutes les anomalies et proposer des marges d'amélioration. Les anomalies et les améliorations sont traitées et suivies :

- sur les fiches de risques et le tableau de suivi des risques,
- sur les fiches d'étude d'anomalie (FEA) et sur les fiches d'amélioration (FA),
- sur les listes d'actions de comptes rendus des différentes instances de décision,
- sur les constats figurant sur les rapports d'audit. L'exploitation des rapports d'audit est décrite dans la procédure "**Audit interne**".

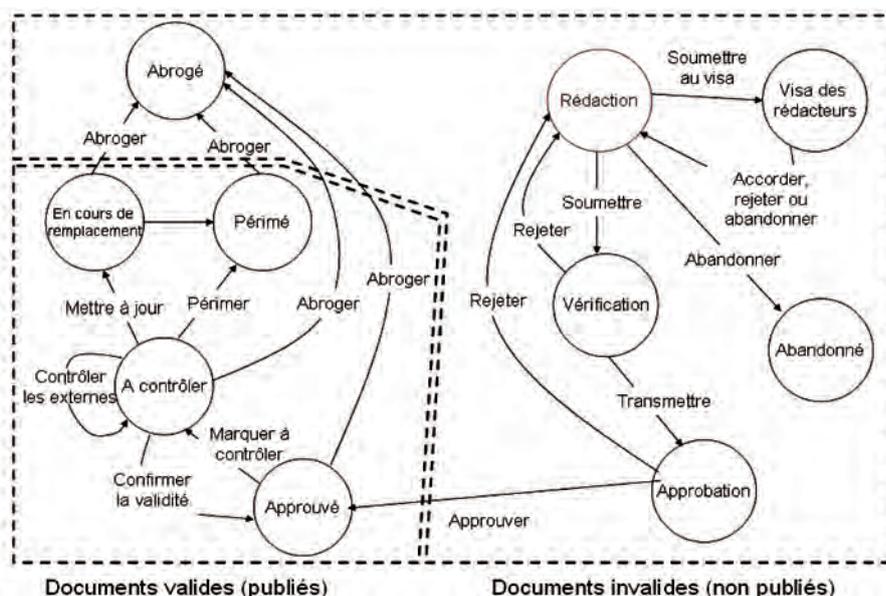
Le suivi des fiches (FA et FEA) s'appuie sur un outil informatique appelé communément "Gestionnaire des FA et FEA" dont l'utilisation est définie dans une procédure générale "**Traitement des anomalies et des améliorations**". Le schéma suivant illustre le traitement des anomalies et des améliorations ; il précise également que, dans le cas d'une détection d'anomalie produit, la procédure "**Maîtrise des produits non-conformes**" est appliquée.

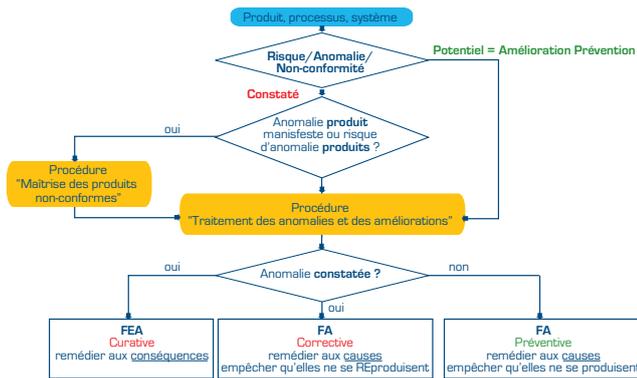
L'ORGANISATION QUALITÉ DU SHOM

L'organisation hiérarchique du SHOM est décrite dans des organigrammes et dans des documents spécifiques, gérés dans le "référentiel documentaire", qui précisent les responsabilités de chaque composante principale et de ses entités subordonnées.

Le SMQ du SHOM s'appuie sur la DQMN (QAL), composée du délégué du directeur général du SHOM pour la qualité (DDSQ) et des ingénieurs qualité "opérations" (QAL/OPS) et "méthodes, moyens, projets" (QAL/MMP) ainsi que sur un réseau d'acteurs de la qualité, dont les attributions sont décrites dans des fiches emploi type. Ces acteurs sont :

- les pilotes de processus,
- les correspondants qualité,
- les correspondants qualité de proximité,
- les auditeurs internes.



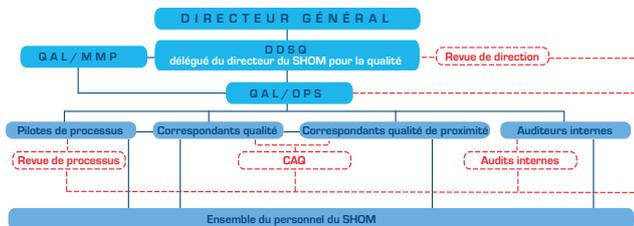


Des "rendez-vous qualité" sont planifiés pour maîtriser et améliorer les différents processus et de façon plus générale, le SMQ dans son ensemble. Les déroulements de ces points qualité font l'objet de documents gérés dans le référentiel documentaire. Ce sont :

- les revues de processus qui fournissent un bilan du processus effectué par le pilote avec les différents acteurs du comité de pilotage du processus,
- les comités d'amélioration de la qualité (CAQ) qui fournissent principalement une vision précise sur le fonctionnement des processus par le suivi des indicateurs, de la documentation afférente, des actions d'amélioration, de la gestion des risques et des résultats d'audits,
- les audits internes qui permettent de mesurer la performance du système de management de la qualité du SHOM, en regard des exigences normatives de l'ISO 9001.

Les différentes informations issues de ces rendez-vous qualité sont les données d'entrée de la revue de direction.

Le comité de direction assure le suivi des actions décidées en revue de direction et provoque les actions complémentaires ou urgentes qu'il juge nécessaire.

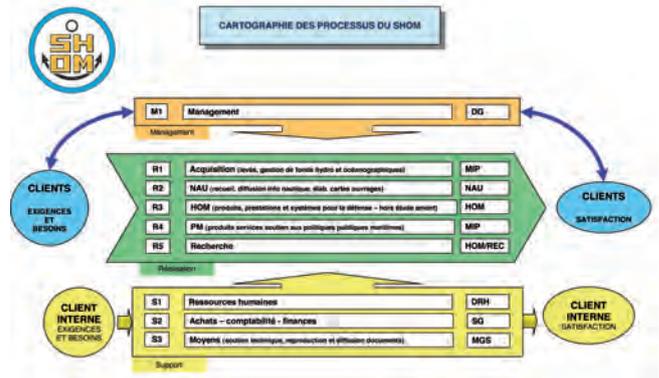


CARTOGRAPHIE DES PROCESSUS DU SHOM

Les processus du SHOM s'intègrent dans trois grands ensembles : pilotage (M), réalisation (R) et support (S). Pour satisfaire au mieux les clients du SHOM et garantir un niveau de qualité de ses produits et prestations, les processus de réalisation sont construits autour de ses trois grandes missions :

- service hydrographique national, représenté majoritairement par le processus R2,
- service de la défense, représenté majoritairement par le processus R3,
- soutien aux politiques publiques maritimes, représenté majoritairement par le processus R4.

Les deux autres processus de réalisation R1 et R5 contribuent de manière transversale à ces trois missions.



Chaque processus est décrit dans un dossier de processus comprenant :

- le milieu environnant du processus où figurent les éléments d'entrée, le résultat du processus, le déclencheur de début, le déclencheur de fin, les indicateurs, les ressources, méthodes et moyens,
- le logigramme représentant l'enchaînement des différentes étapes du processus, dans sa globalité,
- la fiche descriptive du processus qui décrit notamment, l'objet, le périmètre, les différentes interfaces, les activités, les clients, les partenaires, les fournisseurs, les ressources humaines contribuant au bon fonctionnement du processus, les objectifs et le détail de calcul des différents indicateurs associés et un plan de communication spécifique au processus.

Les interactions entre les processus sont décrites dans une matrice disponible dans le "référentiel documentaire" du réseau intranet.

LES DISPOSITIONS RELATIVES À LA CELENV ET À L'ECOMETOC

Suite au changement de statut du SHOM, la cellule d'environnement de la marine (CELENV) et l'école des marins météorologistes-océanographes (ECOMETOC), qui lui étaient précédemment rattachées au sein de l'antenne de Toulouse du SHOM, restent des unités de la marine nationale. Le référentiel qualité du SHOM continue néanmoins de s'appliquer à leurs activités compte tenu de leur imbrication avec celles du SHOM. A cet effet, une convention rédigée entre le SHOM et les autorités organiques de la CELENV et de l'ECOMETOC définit les modalités de fonctionnement dans le domaine de la qualité.



CARTOGRAPHIE DES PROCESSUS DE LA CELENV ET DE L'ECOMETOC

La cartographie des processus de la CELENV et de l'ECOMETOC est construite selon les mêmes principes exposés ci-dessus pour décrire l'activité de ces deux unités.

Cette cartographie met en évidence le soutien du SHOM dans le domaine de la qualité et des moyens informatiques. Le processus de réalisation R CELENV est également en interface avec un processus du SHOM : le processus "HOM, produits, prestations et systèmes pour la défense (hors études amont)".

LES CLIENTS ET LES PRODUITS DU SHOM

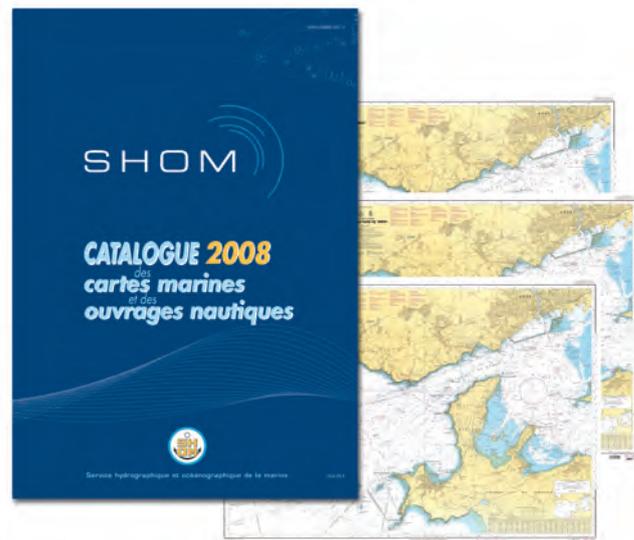
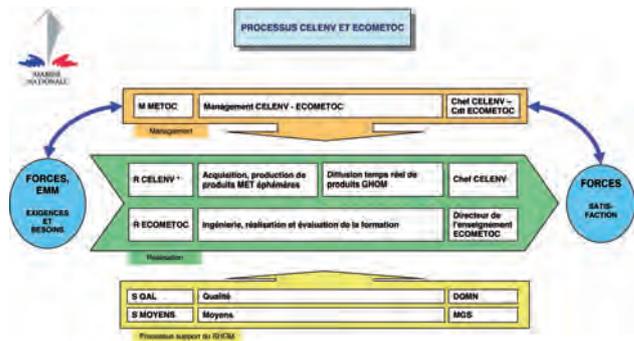
Les clients du SHOM sont représentés par trois principaux comités : le comité directeur de l'océanographie militaire (CDOM), le comité scientifique de l'océanographie militaire (CSOM) et le comité consultatif des utilisateurs des documents, levés et prestations du SHOM (CUSH). Les types de client et leurs exigences sont listés dans un document spécifique présent dans le "référentiel documentaire".

Les principaux produits publics du SHOM sont listés dans deux catalogues :

- le "petit catalogue" qui présente une sélection de documents nautiques édités par le SHOM,
- le "grand catalogue" qui présente l'ensemble des documents nautiques notamment les cartes marines, les cartes électroniques de navigation, les annales hydrographiques, etc.

L'ensemble des produits et prestations publics du SHOM est listé dans un document présent dans le "référentiel documentaire".

Un catalogue spécifique est édité au profit de la Défense.



LEXIQUE

CAQ : Comité d'amélioration de la qualité
 CELENV : Cellule d'environnement de la marine
 DDSQ : Délégué du directeur général du SHOM pour la qualité
 DQMN : Directeur de la qualité, des méthodes, de la normalisation et du contrôle de gestion
 ECOMETOC : École des marins météorologistes-océanographes

EMM : Etat-major de la marine
 FA : Fiche d'amélioration
 FEA : Fiche d'étude d'anomalie
 ISO : International Organization for Standardization
 SHOM : Service hydrographique et océanographique de la marine
 SMQ : Système de management de la qualité



par Catherine LE ROUX, ingénieur principal des études et techniques d'armement et al¹.

RÉSUMÉ

Le projet Litto3D® a pour objectif la production d'une base de données bathymétriques et topographiques liant de façon continue et cohérente les parties immergées et émergées qui composent le littoral. La constitution de ce socle géométrique se décline en deux gammes de produits : Histolitt (pour historique littoral) basé sur les données existantes et Litto3D® constitué à partir de données précises et denses à acquérir. Cet article introduit la norme sur les spécifications de levés nécessaires au projet Litto3D®.

ABSTRACT

The aim of Litto3D® is to produce a seamless bathymetric and topographic database covering the littoral zone. This database will be made available with 2 range of products: Histolitt, based upon historical existing and sparse data, and new Litto3D® data which remain to be collected. This article introduces the current technical specifications for Litto3D® surveys.

(1) Yves Pastol - Laurent Louvart

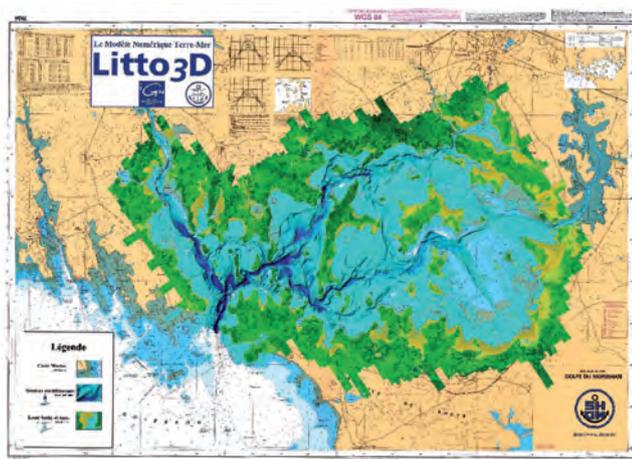
EXPÉRIMENTATION SUR LE GOLFE DU MORBIHAN :

Un démonstrateur a été réalisé sur le golfe du Morbihan en juin 2005 sur financement du ministère de la défense (535 k€). Un levé par laser bathymétrique y a été effectué en complément de levés hydrographiques par sondeur acoustique multifaisceau (SMF). Le levé d'un site de plageage sur Kerjouano au sud du golfe a été réalisé pour des besoins militaires afin de valider l'intérêt de la technique laser pour la mise en oeuvre du concept OTAN de *Rapid Environmental Assessment* (REA). Le SHOM et l'IGN ont souhaité montrer qu'il était possible de réaliser un modèle topographique et bathymétrique précis, dense, cohérent et continu, par combinaison de différents moyens d'acquisition modernes.

Les objectifs du démonstrateur étaient les suivants :

- connaître les performances et les limites d'emploi d'un bathymètre/topomètre laser ;
- comparer et fusionner les mesures laser avec des données de sondeurs bathymétriques ;
- compléter l'expertise technique de haut niveau du SHOM sur l'ensemble des moyens de mesure bathymétrique ;
- élaborer des recommandations à l'attention de tous les partenaires de Litto3D® : méthodes de levés, maîtrise des références et de la qualification des données.

Le golfe du Morbihan offre une grande variété de reliefs et de thématiques. C'est une zone qui concentre un large panel des difficultés à résoudre : profondeurs variées de 0 à 50 m, turbidité, courants forts, large zone intertidale, influence forte de la marée et de sa propagation, plages de sable ou côte rocheuse caractéristiques des côtes de France. C'est aussi un lieu très fréquenté par les navigateurs en période estivale et le SHOM devait y actualiser complètement la carte et les documents nautiques existants.

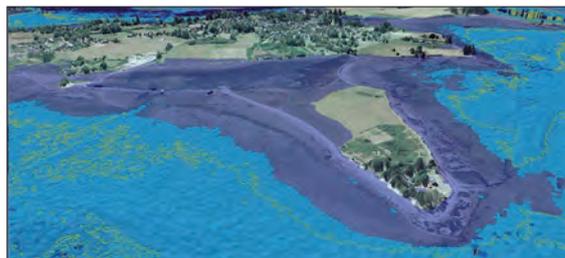


Modèle altimétrique Litto3D® sur le golfe du Morbihan

Déroulement

Un bathymètre/topomètre laser SHOALS 1000 T de la société canadienne Optech a été installé sur un avion bi-moteur type CESNA 404. Ce laser travaille en lumière proche infrarouge (1064 nm) et dans la couleur verte (532 nm).

Pour le levé du golfe, chaque mesure de profondeur satisfait individuellement aux exigences de l'ordre 1 de la norme S 44 de l'Organisation hydrographique internationale (précision verticale absolue de 50 cm ; horizontale de 5 m). La zone n'a pas été complètement illuminée au laser et il n'est pas acquis que tous les hauts fonds aient été détectés (cette information est essentielle pour la sécurité de navigation). La résolution spatiale du laser est d'une mesure par maille de 4x4 m avec un recouvrement d'environ 20 % entre chaque fauchée. Le traitement des données a été réalisé en temps différé. L'objectif était de lever la totalité de la zone : ceci n'a pas été possible dans une petite zone rendue très turbide suite à un dragage à la palourde.



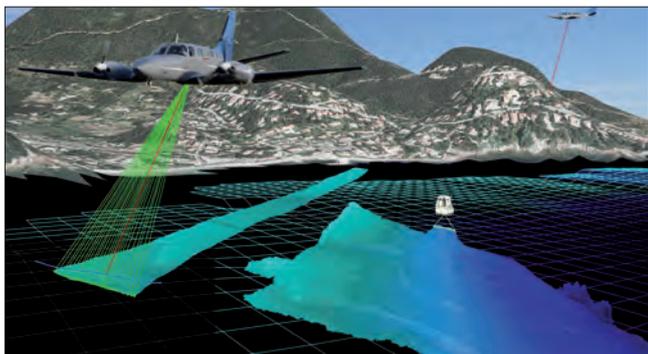
Simulation d'une montée des eaux (surcote)

Conclusions

- Le levé du golfe du Morbihan montre la nécessité des levés au bathymètre laser pour obtenir une connaissance complète du littoral français : les techniques acoustiques ne permettent pas de traiter les zones les moins profondes, alors que la connaissance des reliefs côtiers et des zones d'estran est essentielle pour la mise en œuvre d'une gestion intégrée cohérente des activités littorales.
- Les levés acoustiques multifaisceaux sont nécessaires pour les profondeurs importantes et la calibration des levés laser. Ils doivent plutôt être conduits après le levé laser afin de bien les compléter.
- Seule la combinaison d'un levé acoustique multifaisceau, d'un levé bathymétrique laser et d'un levé topographique laser permet de générer un modèle de terrain côtier continu et cohérent entre la terre et la mer.
- Une recommandation (norme) sur les levés bathymétriques laser a été adoptée et pourra être utilisée pour effectuer ce type de levé et garantir la ré-utilisabilité des données. Elle est jointe à cet article (version du 22 octobre 2008).
- La disponibilité d'un modèle marégraphique ou hydrodynamique à haute résolution est essentielle à la fois pour la conduite du levé, et pour l'exploitabilité des mesures effectuées (référencées à l'ellipsoïde).

EXPÉRIMENTATION SUR LE LITTORAL DE LA RÉGION TOULONNAISE :

Une seconde expérimentation a été organisée à l'automne 2007 sur le littoral de la région toulonnaise pour prendre en compte les problématiques particulières à cette zone (marée de très faible amplitude, falaises, zones peu profondes, variations des conditions de turbidité, herbiers...) et mettre en œuvre deux lasers aéroportés, l'un bathymétrique, l'autre topographique.



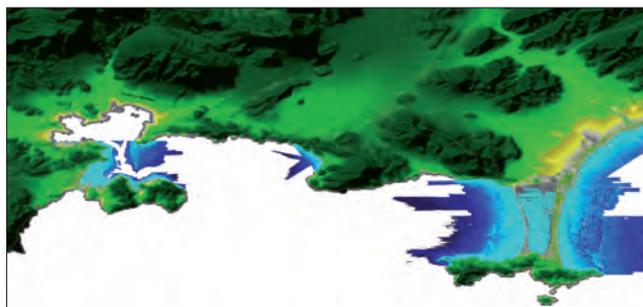
Dans les zones couvertes, il n'existait que des données anciennes. Si elles peuvent convenir pour la navigation et pour quelques applications connexes, elles sont bien insuffisantes pour l'ensemble des besoins actuellement exprimés sur le littoral, en termes de gestion intégré de la zone côtière et de prévention des risques notamment.

Au-delà de la réponse à ces besoins nouveaux et d'une ultime vérification des performances attendues, cette expérimentation démontre qu'avec l'expérience et le soutien du SHOM et de l'IGN, l'Etat (direction générale de la mer et des transports – DGMT et fonds national pour l'aménagement et le développement du territoire - FNADT), un conseil général (Var) et une collectivité locale (Toulon Provence Méditerranée – TPM) sont capables d'unir leurs efforts et de contribuer financièrement (140 k€) à un projet commun.

Déroulement

Le levé laser bathymétrique, effectué sur deux jours fin septembre 2007, a permis d'obtenir des données jusqu'à 37 mètres de profondeur. Un levé acoustique SMF a été réalisé en complément mi-octobre pour atteindre de plus grandes profondeurs à l'est et l'ouest de la presqu'île de Giens. Début 2007, deux autres levés SMF avaient permis d'acquérir des données d'une part sur une pastille permettant de contrôler les données laser et d'autre part le long de la grande jetée protégeant la rade de Toulon. La comparaison des données de laser bathymétrique et celles de la pastille de contrôle donnent d'excellents résultats (différence en moyenne de 2 cm et au maximum de 10 cm). La validation de ces données par le SHOM est en cours.

En complément, un levé spécifique au laser topographique a été conduit en juin 2008 pour acquérir des données sur le littoral terrestre et disposer d'une continuité géométrique meilleure et plus étendue que celle obtenue sur le golfe du Morbihan.

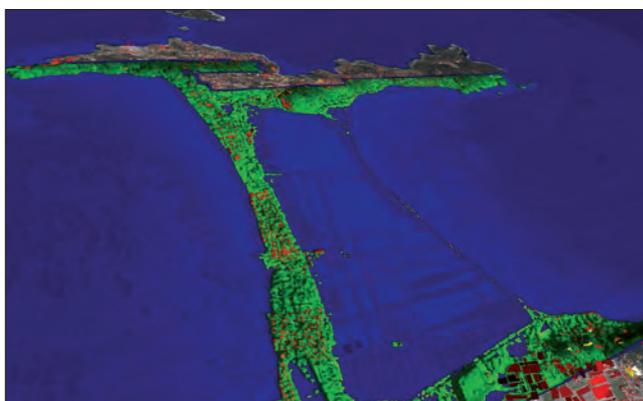


Données de laser bathymétrique

Premières conclusions

Les données acquises sont pour l'essentiel encore en cours de traitement, on peut néanmoins tirer des premières conclusions quant à la conduite du levé en région toulonnaise :

- l'expérience acquise dans le golfe du Morbihan a permis au SHOM d'assister efficacement la maîtrise d'ouvrage et de valider le cahier des charges pour un levé précis parfaitement réutilisable ;
- lorsque la transparence des eaux est bonne, des profondeurs importantes peuvent être atteintes (près de 40 mètres) ce qui simplifie la conduite des compléments à mener avec des techniques acoustiques ;
- il est préférable d'effectuer les compléments acoustiques après l'exécution du levé laser ;
- le modèle économique associé au montage financier de l'opération mis en place est viable et efficace.



Simulation de montée des eaux (-1 m et +3 m /IGN 69)

REPUBLIQUE FRANCAISE

MINISTERE DE LA DEFENSE

SERVICE HYDROGRAPHIQUE ET OCEANOGRAPHIQUE DE LA MARINE
(EPA SHOM)

13, rue du Chatellier
CS 92803
29228 BREST CEDEX 2

Direction des opérations

MIP/PEP Litto3D



RECOMMANDATION NATIONALE
Version du 10 janvier 2009

LEVÉS au Laser bathymétrique de type LITTO3D®

Ce document est la propriété intellectuelle inaccessibile du SHOM.

SOMMAIRE

1. ENJEU NATIONAL	3-9
2. OBJET DU DOCUMENT	3-9
3. AUTRES DOCUMENTS APPLICABLES	3-9
4. EXIGENCES SUR L'ORGANISATION	3-9
4.1 Généralités	3-9
4.2 Phases d'étude	3-10
4.3 Phases préparatoires	3-10
5. EXIGENCES SUR LE POSITIONNEMENT DES MESURES	3-11
5.1 Géodésie et nivellement	3-11
5.2 Stations GPS différentielles	3-11
5.3 Localisation des porteurs	3-11
6. EXIGENCES SUR LES MESURES PAR LASER AÉROPORTÉ	3-11
6.1 Calibration du laser par mesures in situ	3-11
6.2 Mise en œuvre et calibration du laser	3-12
6.3 Tactique de vol	3-12
6.4 Stratégie de mesures	3-13
6.5 Exécution du levé laser	3-13
6.6 Périmètre contractuel	3-13
7. EXIGENCES SUR LES COMPLÈTEMENTS	3-14
8. EXIGENCES SUR LE TRAITEMENT ET LA VALIDATION DES MESURES	3-14
8.1 Généralités	3-14
8.2 Traitement de la localisation	3-14
8.3 Traitement de la marée	3-14
8.4 Traitement de l'altimétrie et de la bathymétrie	3-15
8.5 Traitement des images	3-15
9. EXIGENCES SUR LES FORMATS DES MESURES	3-15
10. EXIGENCES SUR LES PRODUITS	3-16
11. EXIGENCES DE MANAGEMENT	3-16
11.1 Plan de management	3-16
11.2 Délais d'approbation des documents intermédiaires	3-16
11.3 Gestion de configuration	3-16
11.4 Réunions	3-16
11.5 Echange des informations	3-17
11.6 Délais du titulaire	3-17
11.7 Evaluation de la proposition technique et financière	3-17
11.8 Opérations de vérification et d'admission	3-17
12. RÉCAPITULATIF DES FOURNITURES	3-17

1. ENJEU NATIONAL

Les levés de type Litto3D® doivent permettre au travers d'acquisition de mesures sur le terrain, la constitution progressive d'un modèle numérique altimétrique régulier et continu dans l'espace, sur la mer et sur une portion de terre contiguë, de résolution décimétrique (5 m), de précision métrique en XY (1.5 m de précision¹, tolérance² égale à 2.8 m) et de précision métrique globale en Z (30 cm de précision, tolérance égale à 40 cm)³.

Ce modèle est appelé à devenir le socle commun à la plupart des applications de gestion intégrée en zone côtière. C'est la composante géométrique nationale du référentiel géographique du littoral identifié par le Conseil National de l'Information Géographique.

La cohérence et l'efficacité des politiques littorales dépendent en partie de la rigueur avec laquelle les levés de type Litto3D® auront été exécutés.

Aucune information sur les coûts des levés Litto3D® n'est fournie dans ce document à vocation essentiellement technique. Il faut tout de même rappeler que la globalisation nationale des besoins et la cohérence technique rendue possible par l'adoption des présentes recommandations, doivent permettre de réaliser des économies d'échelle, de réduire les coûts de constitution du modèle Litto3D® et donc d'augmenter les chances d'atteindre l'objectif visé. Les conditions tarifaires d'accès aux informations des services géographiques officiels et mentionnées dans le présent document, pourront faire l'objet de conventions particulières avec le maître d'ouvrage.

2. OBJET DU DOCUMENT

L'objet de ce document technique et contractuel est de décrire des levés au laser bathymétrique de type Litto3D® et de fournir des recommandations de portée nationale aux maîtres d'ouvrage. Ces recommandations ont valeur d'exigence pour la maîtrise d'œuvre et doivent être incluses dans les cahiers des clauses techniques particulières des levés se recommandant du label Litto3D®. En fin de document, ces exigences sont synthétisées selon une approche de type appel d'offres, en critères de sélection des candidats et de choix du maître d'œuvre ou titulaire, selon une pondération fonction de la difficulté, du coût et de la plus value technique.

Ces recommandations ont été établies à partir de l'expertise nationale du SHOM dans la mesure de la bathymétrie et du retour d'expérience qu'il a acquis au travers des démonstrateurs Litto3D® du Golfe du Morbihan (juin 2005) et de la région toulonnaise (septembre 2007). Elles reflètent la maturité des capteurs ou des sociétés pour des levés au laser bathymétrique de type Litto3D®. Elles sont donc appelées à évoluer au travers des versions successives de ce document.

3. AUTRES DOCUMENTS APPLICABLES

[1] Norme Publication Spéciale n°44 – OHI ;

[2] Norme des levés bathymétriques - réf. SHOM NR2005-005 – SHOM ;

[3] Classes de précision applicables aux travaux topographiques – IGN - Arrêté du 16/09/2003 - JO n° 252 du 30/10/2003 pages 18546 et 18549 ;

[4] Systèmes géodésiques officiels français - Décret n° 2000-1276 du 26 décembre 2000 modifié ;

[5] Norme sur la mesure des hauteurs d'eau - réf. SHOM NR2005-009 – SHOM ;

[6] Recueil et diffusion des informations nautiques – Instruction du Premier Ministre n° 228/SGMER du 3 mai 2002 ;

4. EXIGENCES SUR L'ORGANISATION

4.1 Généralités

Le maître d'ouvrage décide de la période de démarrage des travaux et du déclenchement de l'ordre de service.

Le titulaire réalise toute la maîtrise d'œuvre du levé en respectant les exigences, les normes et les recommandations du maître d'ouvrage. Pour cela il doit disposer en son sein, ou par voie de sous-traitance, de toutes les compétences nécessaires et désigner des personnes capables. En plus des exigences contenues dans le cahier des clauses techniques particulières, le titulaire doit notamment prendre connaissance, respecter, appliquer les règles contenues dans les documents [1] à [6] et rappelées dans le présent document. Toute dérogation à ces règles doit avoir reçu l'approbation du maître d'ouvrage.

Les zones de travail sont décrites dans des planches graphiques jointes au cahier des clauses techniques particulières. La délimitation géographique précise du levé doit être approuvée par le maître d'ouvrage après avoir été convenue avec le titulaire. Les profils de mesures réalisés qui débordent des limites théoriques ne doivent pas être artificiellement tronqués sur ces limites.

La stratégie du levé doit s'accommoder des conditions météorologiques et des contraintes environnementales du moment. Il revient au titulaire de décider de la période du levé dans un délai maximum à convenir par le maître d'ouvrage, à compter de l'ordre de service du marché. Si le maître d'ouvrage n'influe pas sur l'organisation et la planification de la maîtrise d'œuvre, il doit cependant être informé avec un préavis suffisant de toutes les décisions prises, au travers des compte rendus de levés journaliers ou de réunions au moins hebdomadaires, notamment lorsqu'il doit apporter son concours.

Pendant la durée des levés laser, le site du levé est entièrement instrumenté par le titulaire dans les domaines de mesures décrits ci-après. Tous les matériels nécessaires au levé laser (capteurs, porteurs, récepteurs et stations GPS différentielles, marégraphes ...) sont choisis, fournis et mis en œuvre par le titulaire.

Conformément à la réglementation [6], toutes les informations nautiques susceptibles d'engager la sécurité de la navigation de surface, liées à l'instrumentation de la zone du levé ou non, et constatées par le titulaire, sont signalées et transmises sans délai par celui-ci au SHOM ou à l'autorité locale, qui prendra l'initiative de diffuser ou non les informations, par le canal officiel le plus approprié.

Le titulaire fournit les procédures de mise en œuvre des capteurs et de traitement des données, l'homologation sanitaire des têtes laser, les certificats de calibration, d'étalonnage et les contrôles qualité réalisés lors des mises en œuvre pour approbation par le maître d'ouvrage.

En plus des fournitures techniques, le titulaire rédige et communique au maître d'ouvrage pour information et approbation, un plan de management, récapitulant l'organisation de la maîtrise d'œuvre et détaillant notamment le management des risques, la gestion en configuration de l'ensemble de la documentation du projet, ainsi qu'un calendrier prévisionnel de l'ensemble des tâches à réaliser.

La période de validité de l'offre du titulaire, la durée des travaux, les charges de travail ainsi que le préavis de l'ordre de service du maître d'ouvrage doivent apparaître dans la proposition du titulaire. Les coûts sont décomposés selon les étapes chronologiques suivantes :

- l'étude de faisabilité et de définition ;
- la préparation du terrain ;
- le levé par laser aéroporté ;
- le complètement des résultats laser ;
- la validation et la qualification des résultats.

4.2 Phases de l'étape préliminaire

L'étape préliminaire comporte au minimum :

- la définition des objectifs du levé : la zone géographique à couvrir et les exigences de résultats ;
- la collecte des informations existantes : les cartes marines et terrestres en service, les annuaires ou modèles de marée, les guides, les plans topographiques et les instructions nautiques ;
- la planification et l'estimation des coûts : le calendrier de réalisation, les fiches de tâches, la répartition des travaux entre les personnes, le plan de vol laser, les profils de levé bathymétrique ;
- la reconnaissance des sites : la typologie de la côte (falaise, plage, habitat ...), aéroport (conditions d'utilisation), les secteurs restreints (zones militaires, aéroports, sites nucléaires, ...), les réseaux et les points géodésiques, les marégraphes en place, les stations météorologiques, les sites favorables pour installer marégraphes ou stations GPS différentielles ;
- l'étude des risques environnementaux : la climatologie, la turbidité, les effluents naturels pouvant interférer ;
- l'étude des risques matériels : les taux de pannes des capteurs, les indisponibilités de l'aéroport, les travaux pouvant interférer avec les mesures (les rejets de barrage ou d'écluse, les dragages, les chalutages, les manifestations nautiques ...)

- la vérification de la disponibilité et la location des matériels ;
- éventuellement, l'abonnement aux bulletins météorologiques pour l'aviation ;
- la vérification de la disponibilité et la réservation des locaux sur place pour le traitement en temps peu différé, pour le rangement des matériels et des rechanges ;
- l'élaboration d'un plan de communication local : administrations, élus, presse, riverains, professionnels, touristes ...

Cette étape préliminaire fait l'objet d'un rapport préliminaire, rédigé par le titulaire.

4.3 Phases de l'étape préparatoires

L'étape de préparation et d'instrumentation du site comporte au minimum :

- la communication et les demandes d'autorisations officielles : administrations, préfecture, mairies, comités des pêches, associations de plaisanciers, direction de l'équipement et des transports ...
- l'acheminement des matériels et des personnes ;
- l'aménagement des locaux sur place, le rangement et/ou le déploiement des matériels ;
- l'installation, l'étalonnage (hors calibration) et la vérification de bon fonctionnement des matériels et des moyens de communication ;
- l'affinage de la planification à partir des conditions observées sur place et des prévisions à court terme ;
- la rencontre avec les personnels du ou des aéroports de base ;
- la visite aux autorités et à la presse locale avant le démarrage des travaux ;
- les travaux géodésiques de rattachement des stations différentielles GPS et des marégraphes ;
- le démarrage des stations GPS différentielles ;
- la préparation de la récupération des hauteurs d'eau (serveur SONEL) et/ou le démarrage des mesures de marée ;
- la préparation de la récupération des bulletins météorologiques spécifiques de la zone du levé, exploitable pour la mise en œuvre des porteurs (vent, nébulosité, état de la mer ...) et des capteurs (Météo-France ou un prestataire de service capable d'établir ce type de prévisions) et/ou le démarrage des mesures météorologiques.

Cette étape préparatoire fait l'objet d'un rapport de préparation, rédigé par le titulaire.

5. EXIGENCES SUR LE POSITIONNEMENT DES MESURES

5.1 Géodésie et nivellement

Les paramètres et les méthodes de rattachements des mesures aux zéros terrestres et hydrographiques (grille d'écart, modèle de marée...), les paramètres de changements de systèmes géodésiques, les coordonnées des points géodésiques et de nivellement nécessaires et préalables aux travaux, dans les systèmes de référence officiels, sont récupérés par le titulaire auprès des services géographiques officiels (IGN, SHOM).

Toutes les mesures (GPS, hauteurs d'eau) sont rapportées dans les systèmes géodésiques officiels [4], en coordonnées géographiques (λ , φ) avec une hauteur (h_g) rapportée à l'ellipsoïde d'une part, aux zéros terrestre et/ou hydrographique d'autre part.

5.2 Stations GPS différentielles

La seule souscription à un abonnement de type WAGPS par satellites est insuffisante pour un levé de type Litto3D® car la maîtrise de la précision de localisation des porteurs doit être totale, en temps réel comme en temps différé.

Les stations de référence sont des stations différentielles GPS bi-fréquences à corrections de phase. Leur nombre et leur disposition doivent permettre de limiter au maximum les problèmes liés à la surcharge océanique, les risques de masquage, les réflexions multiples et l'âge des corrections (longueur des lignes de base avec l'aéronef) et d'assurer une continuité de service. Cela implique nécessairement (mais ce n'est pas une condition suffisante) qu'elles soient proches des zones levées.

Les fréquences d'émission des corrections différentielles doivent avoir été agréées : le titulaire demandera aux autorités locales les autorisations d'émission et d'installation correspondantes pour toute la durée des travaux.

Le titulaire peut utiliser les points géodésiques existants pour les stations de référence s'ils sont bien placés et en nombre suffisant. Dans le cas de nouveaux points, la position exacte de chacune des stations de référence est déterminée par le titulaire dans le système géodésique officiel, par mesure de ligne de base statique à partir de 2 points au moins du réseau géodésique officiel de base. La précision absolue des coordonnées des stations doit être centimétrique. Le réseau ainsi constitué est géométriquement compensé. Des fiches géodésiques sont rédigées par le titulaire. Elles comporteront les résultats et les détails des calculs géodésiques. Ces fiches servent à la configuration des stations différentielles et sont transmises au maître d'ouvrage.

Les modèles troposphériques et ionosphériques utilisés pour les calculs sont paramétrés en fonction de la climatologie du site et des observations météorologiques faites avant et pendant les mesures.

Des cibles GPS différentielles sont réalisées au début des travaux sur des points géodésiques connus, à proximité de chaque station de référence, pour s'assurer qu'il n'y a pas de biais (erreur dans la position de référence) ou d'anomalies particulières. La qualité des points est enregistrée au niveau de chaque station différentielle avec une cadence d'acquisition des mesures de 10 minutes : dilutions des précisions (PDOP, HDOP ...), âge des corrections différentielles, nombre de satellites à une élévation minimale de 15°.

Les observations brutes (signaux et phases GPS) sont systématiquement enregistrées sur les stations différentielles pour le traitement en temps différé de la localisation des porteurs.

5.3 Localisation des porteurs

En règle générale, la méthode de localisation ne doit pas dégrader les performances des capteurs, en termes de résolution et de précision.

Pour le suivi des profils, les porteurs sont localisés en mode GPS de navigation et si possible en mode cinématique temps réel depuis les stations GPS différentielles de référence installées par le titulaire. Une centrale inertielle fournit l'attitude des porteurs. Les positions des porteurs sont corrigées de l'attitude des porteurs en temps réel et les capteurs sont asservis en conséquence.

Les observations brutes (signaux et phases GPS) sont systématiquement enregistrées sur les porteurs pour le traitement en temps différé de la localisation des trajectoires. Les paramètres auxiliaires de la centrale inertielle sont également enregistrés.

6. EXIGENCES SUR LES MESURES PAR LASER AÉRO-PORTÉ

6.1 Contrôle du laser par mesures in situ

Des zones de références altimétriques (vérités terrain) sont préalablement cotées par levés bathymétriques ou topographiques. Ces zones servent au contrôle du laser à terre et en mer.

Des zones distinctes à terre et en mer sont choisies à partir des informations existantes ou sont déterminées in situ à partir de levés de reconnaissance, selon les critères suivants :

- les terrains sont si possible proches des travaux à réaliser, d'un aérodrome pour les contrôles de début et de fin de vol, et d'un marégraphe côtier numérique du réseau RONIM ;
- les terrains sont plans (éventuellement inclinés) ;
- les terrains sont homogènes en termes de nature du sol (routes, aérodromes, toits de hangars, terrains de sport ...), ou sinon, caractéristiques des travaux à réaliser ;
- les terrains sont peu variables dans le temps (sédiments stables, pas de végétation...) ;
- les terrains ont des dimensions au moins égales à 200 m x 200 m ;

- les terrains immergés sont peu turbides, ou peu sensibles à la turbidité ;

- pour le contrôle bathymétrique, les terrains immergés doivent être toujours facilement accessibles au laser (la couche d'eau doit être supérieure à 1 m, idéalement 3 m au moment des contrôles). Les contrôles du laser bathymétrique se font en début et en fin de travaux. Ces zones de contrôle respecteront les conditions suivantes :

- pour la Manche :
 - pour les zones de marnage inférieur à 6 m : fonds entre 0 m et 3 m au dessus du zéro hydrographique ;
 - pour les zones de marnage supérieur à 6 m : fonds entre 1 m et 5 m au dessus du zéro hydrographique.
- pour l'Atlantique : fonds de 1 m au-dessus du zéro hydrographique ;
- pour la Méditerranée : fonds entre 2 m et 5 m au-dessous du zéro hydrographique.

Les levés bathymétriques ou topographiques des zones de contrôle sont réalisés selon les spécifications suivantes :

- couverture complète de la zone de calibration par profils réguliers à 50 % de recouvrement ou par quadrillage régulier ;
- cotation altimétrique complète du terrain ;
- 10 % de profils traversiers (sauf si quadrillage régulier) ;
- géo référencement et mosaïquage de l'imagerie ;
- description sommaire de la nature des sols aux endroits caractéristiques ;
- résolution et précision décimétrique des mesures ;
- estimation des incertitudes associées aux mesures ;
- mesures référencées dans le système géodésique officiel, par rapport à l'ellipsoïde associé, ainsi qu'au zéro des altitudes ou au zéro hydrographique de la zone ;
- mesures de turbidité dans la zone.

Un soin très particulier doit être apporté dans la mesure du rattachement et de l'attitude de la géométrie de l'antenne GPS par rapport au capteur.

Les levés bathymétriques de zones de contrôle sont réalisés par sondages SMF, selon les spécifications de l'ordre Spécial de la PS44 de l'OHI [1], soit :

- 25 cm de précision verticale ;
- 2 m de précision horizontale ;
- 1 m de résolution minimale.

Les levés topographiques de zones de contrôle peuvent être réalisés par laser topographique ou par relevés topographiques directement sur le terrain. S'il n'est pas possible de garantir l'invariabilité des zones, les levés de zones de contrôle doivent être réalisés un peu avant et/ou peu après les levés au laser bathymétrique de type Litto3D®, à quelques jours d'intervalle. Pour les zones de contrôle bathymétrique, l'observation de la marée n'est pas indispensable.

6.2 Mise en œuvre et calibration du laser

Le système laser est configuré de manière à :

- émettre toujours au moins simultanément dans les 2 canaux bleu/vert et PIR pour coter à la fois et selon les cas, la terre, le fond de la mer et la surface de l'eau ;
- acquérir les images vidéo de la surface levée pour aider l'interprétation des mesures en temps différé, ce qui impose de travailler de jour ;
- utiliser la centrale inertielle pour suppléer aux masquages ou aux dégradations GPS éventuelles ;
- voler à une altitude telle qu'il n'existe pas de risque sanitaire pour les personnes exposées, et notamment en vision directe ou par rétrodiffusion des faisceaux laser ;
- filtrer efficacement la houle, les vagues et les turbulences atmosphériques à partir de l'adoption d'un paramétrage ad hoc.

Des mesures de turbidité sont réalisées sur le terrain au début du levé et prises globalement en compte par le système. Des contrôles plus fins du laser sont régulièrement faits à terre et en mer, sur les zones de contrôle définies précédemment ou à différents endroits caractéristiques pour vérifier la précision et la répétabilité des mesures laser, au début et à la fin de chaque vol, au moins quotidiennement.

La calibration du laser en XY (synchronisation de la position GPS avec la mesure) est faite indépendamment et avant la calibration en Z (vérification de la cote altimétrique).

6.3 Tactique de vol

Par très faibles profondeurs d'eau (0-1m), les mesures laser peuvent être difficilement exploitables car il est difficile de distinguer dans les signaux réfléchis la surface de l'eau du fond de la mer.

Pour obtenir une continuité altimétrique, il faut donc impérativement survoler cette partie de l'estran à deux instants différents. Pour se garantir d'avoir suffisamment de mesures à cet endroit, la meilleure solution est de combiner les modes bathymétrique et topographique, à différents instants de la marée : par exemple, un vol en mode bathymétrique est exécuté à pleine mer et un vol topographique à basse mer. Ainsi, on dispose de mesures en recouvrement et on peut également comparer et corroborer la qualité des mesures dans les deux modes. La connaissance de la marée (pleines et basses mers) est donc un préalable important.

La délimitation des profils laser en mode bathymétrique, inscrite dans l'emprise du levé, doit être cohérente avec les performances du laser dans ce mode. Il est par exemple inutile de prévoir des vols au-delà de la profondeur moyenne normalement atteinte.

6.4 Stratégie de mesures

La planification des mesures laser est optimisée à partir des considérations suivantes, par ordre d'importance :

- la climatologie est un critère de choix de la saison important, même s'il est statistique et donc soumis aux aléas météorologiques. Le risque peut être minimisé au travers de la globalisation des travaux sur de larges zones, présentant des sensibilités météorologiques différentes ;
- les bulletins de prévisions météorologiques doivent être exploités à la fois pour la mise en oeuvre de l'aéronef mais aussi pour celle du capteur laser : le vent, l'état de la mer et la nébulosité ne doivent pas interférer ou gêner les mesures ;
- une activité biologique intense conduit à des turbidités fortes. Mais elle coïncide malheureusement avec des conditions météorologiques favorables au laser ;
- les prédictions de marée permettent de connaître les étales de pleines et basses mers, ainsi que les coefficients proches des vives eaux (coefficient de marée supérieur à 95) ou des mortes eaux (coefficient de marée inférieur à 45). Les étales de courant doivent être exploitées en priorité pour limiter les problèmes de turbidité et de remise en suspension des sédiments. Les étales de mortes eaux doivent être préférées si la turbidité du site est importante. Les vives eaux sont privilégiées si l'amplitude de la marée est faible et ne permet pas au laser d'accéder aux très faibles profondeurs, quelque soit le mode laser employé, bathymétrique ou topographique ;
- même s'il est acquis que le laser est plus performant la nuit, les vols sont toujours effectués de jour, de manière à disposer toujours des images pour la validation et la qualification des mesures (élimination des échos parasites et des artefacts : les navires par exemple) ;
- l'interférence de l'activité nautique et de la pêche avec les levés doit être maîtrisée et minimisée (connaissance des heures de passage des ferries ou des créneaux de chalutage par exemples) ;
- la qualité de la constellation GPS sur la zone doit également prise en considération au travers des prévisions GPS ;

Une couverture végétale minimale (algues) permettra d'extraire plus facilement le terrain à partir des mesures laser (exemple écho « second depth »). Sur ce point particulier, l'hiver est une saison plus propice aux levés que l'été.

La planification des mesures doit être établie à l'avance, mais aussi pouvoir être modifiée en temps réel pour optimiser l'emploi des moyens. Il est donc important de pouvoir disposer des informations ci-dessus rapidement (au travers d'un réseau de télécommunications efficace notamment).

La planification permet en final d'obtenir très précisément les créneaux de levés et pour chaque levé, les heures de début et de fin de chaque profil de mesures.

6.5 Exécution du levé laser

Toutes les mesures bathymétriques doivent individuellement vérifier en termes de précisions et de résolution au moins l'ordre 1b au sens de la PS44 [1], soit :

- 50 cm de précision verticale ;
- 5 m de précision horizontale ;
- 5 x 5 m de résolution minimale.

Les levés laser sont des levés de zones côtières complètement hydrographiées, sans recherche et sans prélèvement de sédiments, au sens de la norme SHOM [2]. Ce qui signifie que la couverture surfacique est totale, mais qu'il n'y a pas d'assurance d'avoir tout détecté, et que ce qui a été détecté n'a été ni investigué ni coté spécifiquement.

Toutes les mesures altimétriques terrestres doivent individuellement vérifier la norme IGN des levés topographiques à grande échelle et respecter une classe de précision globale choisie égale à 10cm [3], correspondant à l'écart moyen des mesures par rapport au terrain nominal.

Le choix théorique de l'orientation, du recouvrement et de l'espacement des profils peut être remis en cause au cours du vol, si de nouveaux choix permettent d'améliorer la description des ruptures morphologiques du relief : pentes, sommets, cols, cuvettes, crêtes, lits, affouillements ...

Les profils réguliers sont effectués en recouvrement. Aucun trou de mesures laser n'est toléré entre les profils. Le choix du taux de recouvrement est laissé à l'initiative du titulaire.

Pour évaluer en temps différé la cohérence interne du système laser, des profils traversiers sont effectués à raison d'un profil traversier pour dix profils réguliers (cette valeur peut être adaptée suivant la configuration du levé : côtes à falaises, levé d'une bande côtière étroite, ...).

6.6 Périmètre contractuel

Les profils défectueux du fait d'un mauvais état de mer, d'un défaut de localisation du porteur (pannes GPS, défauts de la centrale inertielle ...) ou d'un mauvais fonctionnement du laser (pannes électriques, défauts de paramétrage, mauvaises calibrations ...) sont systématiquement repris par le titulaire.

S'il n'est pas possible d'exiger du titulaire de garantir partout des mesures bathymétriques du fond de la mer, en revanche le titulaire doit respecter l'obligation de couverture du levé dans les limites convenues avec le maître d'ouvrage.

Les profils défectueux du fait de la turbidité de l'eau sont revolés si les conditions de turbidité évoluent favorablement et en fonction de leur importance au sein du levé et du solde de temps disponible. La décision de les refaire ou non est du ressort du titulaire, sur avis du maître d'ouvrage.

Aucun profil de recherche de hauts-fonds n'est effectué, que ceux-ci aient été détectés ou non.

Les masquages liés à la présence de navires donnent lieu à des profils supplémentaires. La méthode de reprise est laissée à l'initiative du titulaire.

7. EXIGENCES SUR LES COMPLÈTEMENTS

En dehors des eaux très claires de certaines régions, du fait de la turbidité, le laser ne peut pas pénétrer au-delà d'une certaine profondeur d'eau (comprise entre 0 et 60 m). Cette profondeur maximale dépend aussi de la puissance du laser et de l'atténuation adoptée⁴. Le laser peut également être mis en défaut dans la tranche d'eau 0-1 m, dans les zones de courants forts ou dans les zones à déferlement. Enfin, la basse résolution et le faible pouvoir discriminatoire du laser en mode bathymétrique ne permettent pas de bien décrire certaines singularités. A ces endroits, il est donc nécessaire de compléter dans la mesure du possible les mesures laser par des mesures in situ.

Le sondage SMF devient efficace, sûr et de bonne qualité à partir de 5 m de profondeur. Il permet de décrire ou de cerner une partie des zones inaccessibles ou indétectables au laser.

Dans le cadre d'un levé au laser bathymétrique de type Litto3D®, il ne s'agit pas de réaliser un levé hydrographique de la zone mais de décrire la topographie du fond. Ainsi, la résolution de Litto3D® (5 x 5 m) ne permet pas la mesure et la prise en compte de tous les dangers pouvant nuire à la sécurité des navigateurs. En revanche, le fait d'associer à chaque mesure une estimation de son incertitude, permet aux hydrographes d'utiliser les levés Litto3D® en complément de leurs levés.

Les levés SMF sont donc menés au moins selon les règles correspondantes à l'ordre 1b de la PS44 de l'OHI [1]. Les levés sont des levés de zones côtières complètement hydrographiées, sans recherche et sans prélèvement de sédiments, au sens de la norme SHOM [2] (voir §6.5). L'application de ces règles permet d'atteindre les spécifications de mesures bathymétriques des levés Litto3D®.

Aux endroits inaccessibles aux sondages SMF (zones à fort déferlement ou à fort courant, fonds très vaseux, fonds inférieurs à 50cm sous base sondeur, cours d'eau non navigables ...), des mesures à pied ou par plongeurs doivent être envisagées, si les conditions matérielles sont acceptables et si la sécurité des personnes est garantie. A défaut, les zones inaccessibles aux mesures sont géographiquement identifiées, circonscrites et qualifiées comme telles.

8. EXIGENCES SUR LE TRAITEMENT ET LA VALIDATION DES MESURES

8.1 Généralités

Cette étape doit faire la preuve que les levés ont été correctement exécutés et déboucher sur des résultats conformes aux exigences et exploitables par le maître d'ouvrage.

L'ensemble des procédures mises en œuvre par le titulaire pour valider les données est fourni pour approbation au maître d'ouvrage. La vérification de la satisfaction des exigences du levé conditionne son admission.

Le titulaire doit utiliser des vérités terrain et la documentation existante pour contrôler la qualité des mesures.

Pour chaque levé traité, les enregistrements des mesures brutes (points GPS, échos laser...) et les résultats intermédiaires (premiers échos, doubles échos...) sont conservés pour pouvoir être rejoués ultérieurement.

Le traitement doit impérativement dissocier la validation interne des mesures (cohérence intrinsèque des mesures, résultats des calibrations), de la validation externe des mesures (contrôles avec des données exogènes et des vérités terrain).

Toutes les données brutes originales doivent être conservées avant nettoyage. Sont concernées : les données validées mais aussi les données douteuses et les données invalidées. Les artefacts de mesure et les mesures douteuses doivent être éliminés des produits finaux et archivés séparément.

Pour chacun des domaines de mesures, un rapport détaillé du traitement des données, décrivant les procédures de traitement, de validation, et les algorithmes employés, est communiqué au maître d'ouvrage, en plus des données brutes et des produits.

8.2 Traitement de la localisation

La localisation des mesures par GPS est entièrement recalculée en temps différé à partir des éphémérides précises des satellites, de modèles atmosphériques paramétrés par la météorologie observée localement (en distinguant celle des stations GPS différentielles et celle des porteurs), des données auxiliaires des centrales d'attitude et des mesures de phases GPS (L1 et L2). La précision de localisation des capteurs doit permettre d'atteindre les spécifications des levés Litto3D®.

8.3 Traitement de la marée

La marée est utilisée à la fois pour la planification des mesures, mais aussi pour la réduction des sondages au zéro hydrographique.

Pour ce dernier point, la norme sur la mesure des hauteurs d'eau du SHOM doit être strictement appliquée [5].

Cette norme précise entre autres au titulaire en charge de l'observation, les critères de lieu, de durée, de continuité, de cadence, de précision des observations, et prévoit le rattachement des mesures aux systèmes géodésiques et de nivellement officiels locaux.

Les observatoires de marée doivent ainsi être rattachés à l'ellipsoïde associé au système géodésique officiel, mais également au zéro des altitudes et au zéro hydrographique de la zone. Les marégraphes permanents sur zone et en

fonction (Réseau RONIM par exemple) doivent être utilisés, et seulement en contrôle.

Des mesures régulières sur des échelles de marée installées et nivelées à proximité des marégraphes doivent être faites, au début et à la fin des levés, et quotidiennement pendant les levés.

- la précision de datation des mesures doit être meilleure que la minute ;
- la précision de rattachement vertical des mesures doit être meilleure que 1 cm ;
- la précision de mesure de la hauteur d'eau doit être meilleure que 5 cm.

La mesure des hauteurs d'eau et la méthode de réduction des mesures bathymétriques diffèrent selon la connaissance de la marée dans la zone. Elles doivent être approuvées par le maître d'ouvrage, avec le concours éventuel du SHOM.

8.4 Traitement de l'altimétrie et de la bathymétrie

Les mesures seront corrigées des biais et renseignées des incertitudes constatées sur les capteurs.

Pour valider et qualifier les mesures, le titulaire tiendra également compte des écarts des profils traversiers au croisement des profils réguliers, des écarts sur les profils en recouvrement, des écarts constatés sur les zones de calibration, mais aussi des écarts avec les données existantes : cartes, documents et produits numériques diffusés par les services géographiques officiels (SHOM, IGN).

Les artefacts identifiés comme tels sont éliminés (lignes aériennes téléphoniques ou électriques, oiseaux, bancs de poissons, automobiles, navires en surface...).

Les mesures douteuses sont isolées et conservées. Elles permettent la définition des compléments après laser ou la définition des zones inaccessibles aux mesures après compléments. Elles correspondent généralement à des zones dangereuses ou inaccessibles à la navigation.

Les masses bâties et les couverts végétaux (arbres ou algues) sont soustraits des mesures altimétriques, de manière à ce que ces dernières soient représentatives du terrain. Pour ce faire le titulaire doit exploiter les signaux laser (exemple : écho « second depth »), les informations issues des cartes, des documents et des produits numériques diffusés par les services géographiques officiels (SHOM, IGN). Aux endroits où il n'est pas possible de déterminer d'élévation, un commentaire doit être associé aux mesures : « bâtiment isolé », « forêt » ...

8.5 Traitement des images

Les images acquises sur profil sont corrigées des paramètres de prise de vue, géo référencées par blocs de triangulation (après saisie de points d'appui et mise en correspondance de points homologues sur les images), rectifiées des déformations du relief tel qu'il a été mesuré

puis mosaïquées sur l'ensemble de la zone levée. Les contrastes de couleur sont rehaussés pour mettre en évidence les différentes natures de sol.

La précision de géo référencement planimétrique des images doit être égale à 5 m dans 95 % des cas (valeur de la tolérance sur l'erreur probable maximale). Cette précision est déduite de la valeur des résidus du modèle de triangulation et après examen de points de contrôle sur les images.

La résolution originale des images est conservée (typiquement : 50 cm). Aucun sur ou sous échantillonnage n'est appliqué.

9. EXIGENCES SUR LES FORMATS DES MESURES

Les mesures représentent selon les cas, l'altitude terrestre ou, la bathymétrie et la surface instantanée de l'eau (les 2 doivent figurer sur le même enregistrement dans le fichier des mesures).

Un fichier de mesures est constitué pour chaque profil de mesure effectué, pour un type de capteur et dans un mode de fonctionnement donné. Des métadonnées sont associées aux mesures pour tracer leur origine et les traitements effectués.

Chaque mesure doit être en coordonnées géographiques (coordonnées non projetées), géo référencée dans les systèmes géodésiques officiels locaux et horodatée dans un système horaire unique pour l'ensemble du chantier (exemple : UTC).

A chaque mesure doit être associée une incertitude géométrique globale, un flag de validation (avec les valeurs « valide », « invalide » ou « douteuse ») et si nécessaire un commentaire (exemple « haut-fond », « navire », « bâtiment isolé » ...).

Des règles de nommages des fichiers doivent être utilisées pour permettre de trier les mesures :

- par type de mesures (points de mesures ou images) ;
- par type de profils (calibration, régulier ou traversier) ;
- par capteur (SMF, laser, perche topographique ou cote plongeur) ;
- par profil (baptême du profil dans le plan de vol théorique) ;
- par reprise de profil (indice concaténé au nom du profil repris par exemple).

Les logiciels utilisés pour le traitement des mesures doivent être certifiés, gérés en configuration et maîtrisés par le titulaire.

Les mesures brutes des capteurs (GPS, signaux laser et données des centrales inertielles) sont fournies dans des formats natifs, si possible compatibles avec les logiciels de traitement de données du commerce.

Le titulaire livre le projet dans le format natif afin de permettre éventuellement un rejeu du chantier.

10. EXIGENCES SUR LES PRODUITS

A l'issue du traitement des mesures, le titulaire réalise des produits de différentes natures.

Le titulaire fusionne les données des parties terrestres et maritimes pour constituer des modèles continus entre la terre et la mer partageant le même système géodésique, dans la résolution 5x5m de Litto3D®. Ceci suppose qu'il n'existe pas de biais entre les données issues des levés bathymétriques et terrestres. Les contrôles des mesures laser (topographiques et bathymétrique) et SMF sur les zones de contrôle permettent normalement de l'assurer, avant même le traitement des mesures.

Le titulaire détermine et propose au maître d'ouvrage un trait de côte à partir de l'exploitation des modèles fusionnés, de la surface théorique des plus hautes mers astronomiques et du géo référencement vertical des mesures par rapport à un niveau de référence terrestre. De même, il propose une limite du niveau des plus basses mers astronomiques. Ces niveaux extrêmes sont fournis par le SHOM, avec les modèles de prédictions de la marée (voir §5.1).

Le titulaire en charge de l'observation de la marée, fournit les mesures de marées validées au maître d'ouvrage.

Le titulaire fournit les emprises des zones inaccessibles aux mesures, les zones turbides, de courants forts ou de déferlement des vagues (écueils, ressac) établies à partir de l'interprétation des images vidéo enregistrées et de la très forte dispersion des signaux laser à ces endroits. Cette fourniture peut prendre la forme d'une image raster avec une légende de couleurs différentes selon les cas rencontrés. Les images individuelles et les mosaïques qui en sont issues font l'objet de fournitures séparées.

Le titulaire fournit les élévations des masses bâties, des aériens et des couverts végétaux (arbres ou algues) rencontrés.

Les produits doivent être livrés dans des fichiers aux formats compatibles avec les systèmes d'informations géographiques standard du marché. Les images sont fournies au format : tif géoréférencé, jpg géoréférencé ou GEOTIFF®, avec un codage RVB monocouche, dans des tailles de fichiers raisonnables.

11. EXIGENCES DE MANAGEMENT

11.1 Plan de management

Les titulaires fourniront un plan de management (PM) pour la réalisation de la prestation. Ce PM doit comprendre au minimum :

- l'identification des responsables de l'exécution des prestations et tous les intervenants (interne ou externe) avec une description précise de leur rôle et responsabilité ;
- la description des procédures retenues pour la gestion du projet ;

- la description des procédures retenues pour la diffusion et l'archivage de la documentation liée à l'exécution de la prestation ;

- les éléments principaux de leur politique qualité ;

- un plan de gestion des risques et les actions associées.

11.2 Délais d'approbation des documents intermédiaires

Le maître d'ouvrage dispose de deux semaines pour vérifier et approuver les documents intermédiaires du titulaire :

- plan de management ;

- calendrier prévisionnel ;

- plan de vol théorique.

Le maître d'ouvrage dispose de deux semaines pour vérifier et approuver les documents relatifs aux étalonnages et à la mise en place des matériels du titulaire.

Toutes les divergences constatées par le maître d'ouvrage par rapport aux exigences du présent document sont reprises par le titulaire.

11.3 Gestion de configuration

L'ensemble de la prestation (documentation, mesures, traitements, tests, gestion du projet...) fait l'objet d'un suivi en gestion de configuration par le titulaire.

11.4 Réunions

L'état d'avancement des différents levés, la comptabilité et la programmation des vols sont régulièrement présentés au cours de réunions de suivi au maître d'ouvrage. Un bulletin journalier est rédigé et lui est adressé, décrivant les travaux réalisés et prévus.

Les réunions de lancement, d'avancement et de clôture des travaux sont organisées dans les locaux du maître d'ouvrage, ou dans des locaux que le titulaire louera et réservera pour la circonstance à l'endroit des levés.

La réunion de lancement est organisée dans un délai de un mois à compter du déclenchement de l'ordre de service du marché.

Si nécessaire, d'autres réunions peuvent être organisées à l'initiative du titulaire.

L'organisation et les comptes rendus de ces réunions sont à la charge du titulaire. L'ordre du jour et le compte rendu sont soumis à la validation du maître d'ouvrage.

Les déplacements sont à la charge de ceux qui se déplacent.

Les documents préparatoires aux réunions intermédiaires et à la réunion finale sont à fournir au minimum une semaine avant la réunion.

11.5 Echange des informations

Tous les échanges d'information entre le titulaire et le maître d'ouvrage se font par écrit (courrier, fax et courrier électronique).

11.6 Délais du titulaire

Le délai d'exécution du marché est déterminé par le titulaire. Ce délai ne doit pas excéder six mois à compter de l'ordre de service du maître d'ouvrage. Les résultats des travaux doivent être fournis au maître d'ouvrage au plus tard deux mois après l'achèvement des levés.

11.7 Evaluation de la proposition technique et financière

La sélection des candidats se fait sur les critères suivants (poids égaux) :

- références antérieures ;
- capacité en termes de disponibilité calendaire des ressources humaines et matérielles ;
- homologation sanitaire des capteurs (critère de rejet en cas de non satisfaction).

Le choix du titulaire se fait sur des critères plus détaillés et pondérés :

- (10 %) Qualification professionnelle des intervenants (FIG OHI Cat A et B, diplôme équivalent, ou compétence avérée en hydrographie, en topographie ...)
- (10 %) Respect de la couverture géographique ;
- (15 %) Engagement sur la tranche 0-1 m de profondeur ;
- (5 %) Engagement sur la profondeur maximum ;
- (5 %) Contrôles qualité ;
- (10 %) Plan de gestion des risques ;
- (5 %) Respect des résolutions et des précisions ;
- (5 %) Elimination du sursol (algues, ...)
- (10 %) Stratégie et tactique de levé ;
- (5 %) Respect des délais ;
- (20 %) Prix par postes et convenance des tarifs journaliers par intervenant.

Pour aider la sélection du maître d'ouvrage, les candidats fournissent une matrice de conformité entre ces critères et leurs propositions techniques et financières. D'autres aspects peuvent bien sûr être également mis en avant par les candidats pour se démarquer des autres propositions.

11.8 Opérations de vérification et d'admission

Le maître d'ouvrage ou ses représentants mandatés vérifient en continu la satisfaction de l'ensemble des exigences contenues dans cette recommandation tout au long du contrat, et en particulier les engagements pris par le titulaire sur les critères de sélection (voir §11.7).

Les contrôles visent donc à vérifier que :

- toutes les exigences énumérées dans ce document sont respectées d'une part ;
- les engagements du titulaire et les prestations supplémentaires mises en avant par le titulaire sont respectés d'autre part ;
- la preuve que les résultats obtenus sur le terrain sont conformes, compte tenu des contraintes environnementales observées.

Le maître d'ouvrage dispose de deux mois après la livraison des fournitures pour effectuer les opérations de vérification et prononcer leur admission.

Toutes les divergences constatées par le maître d'ouvrage sont reprises par le titulaire.

12. RÉCAPITULATIF DES FOURNITURES

Les fournitures attendues sont :

- les rapports et tous les documents intermédiaires en trois exemplaires et en numérique :
 - document de présentation de la stratégie de levé ;
 - rapport préliminaire ;
 - rapport d'étude sur la turbidité ;
 - rapport de préparation ;
 - rapport de traitement ;
 - rapport de levé ;
 - rapport qualité ;
 - rapport de management et de gestion de risques ;
 - les profils suivis et la couverture surfacique ;
- les images individualisées, géoréférencées et non mosaïquées ;
- les mesures de topo-bathymétrie validées, les mesures douteuses et les mesures invalidées, sur une même ligne d'enregistrement, mais dans des fichiers différents pour chaque ligne de vol ;
- le chantier au format utilisé par la chaîne de traitement du titulaire ;
- la procédure de traitement des mesures suivie par le titulaire. Pour chaque levé traité, les enregistrements des mesures (points GPS, échos laser...) et tous les résultats intermédiaires, en plus des fournitures ou des produits décrits ci-après ;
- les contrôles effectués sur les capteurs : étalonnage, calibration... ;
- les traitements et les contrôles effectués sur les mesures : filtrage, détection et élimination des mesures aberrantes (explications des algorithmes utilisés) ;
- les signaux bruts du capteur laser avec une description de leur format ;

- les mesures brutes GPS au format RINEX ;
- les données brutes de la centrale inertielle avec une description de leur format ;
- les produits numériques suivants élaborés à partir des mesures, sur la base des spécifications de Litto3D® :
 - les modèles numériques altimétriques sur le terrain et en mer ;
 - les modèles d'élévation (masses bâties, végétation ...) ;
 - le trait de côte défini comme étant la limite polygonale atteinte à terre par les plus hautes eaux astronomiques ;
 - la limite polygonale à terre des plus basses mers astronomiques ;
 - les modèles d'incertitudes liées aux modèles (budget d'erreurs globales) ;
 - les images individuelles et les mosaïques, géo-référencées et rectifiées ;
- les métadonnées correspondant aux produits ci-dessus (liste à convenir et à adopter avec le maître d'ouvrage) ;
- les contrôles qualité effectués sur ces produits ;
- les comptes rendus validés des réunions ;
- les fiches descriptives individuelles des points géodésiques utilisés pour le levé ;
- une copie du référentiel de gestion de version utilisé par le titulaire au cours des développements pour gérer les évolutions des articles décrits précédemment.

Les produits et l'ensemble de la documentation sont fournis sur disque dur externe en 2 exemplaires. Les supports numériques doivent être lisibles sous OS Windows, UNIX et Linux, et être sans virus connus à la date de la livraison.

¹ Précision : amplitude de l'écart probable à 68 % entre la mesure et la réalité.

² Tolérance : amplitude de l'écart probable maximum (95 % des cas).

³ Sur les seules parties terrestres, la résolution et la précision des mesures sont généralement bien meilleures (15 cm de précision, tolérance égale à 40 cm).

⁴ L'atténuation permet de lever au laser des zones habitées sans risque de dommage physique sur les personnes.

ÉPURATION SURFACIQUE ADAPTATIVE DES DONNÉES BATHYMÉTRIQUES MULTIFAISCEAUX

Nathalie DEBESE

Service hydrographique et océanographique de la marine,
13 rue du Chatellier CS 92803 29228 BREST CEDEX 2

RÉSUMÉ

L'acquisition de données bathymétriques à l'aide de sondeurs multifaisceaux est, à l'heure actuelle, devenue pratique courante. Ces systèmes permettent d'accroître la densité des mesures tout en améliorant leur résolution. La présence sporadique d'erreurs ponctuelles au sein de volumineux lots de données a conduit les services hydrographiques à repenser leurs procédures de validation, jusque-là essentiellement manuelles. Ce papier présente, dans le contexte hydrographique, une généralisation de l'algorithme de validation automatique des données bathymétriques présenté initialement lors de la Conférence Hydrographique du Canada en 1998. La modélisation locale de la bathymétrie, qui repose sur la mise en oeuvre d'un M-estimateur, est robustifiée par une approche hiérarchique d'ajustement automatique des aires d'estimation. Sa construction dynamique, analogue à celle d'un quadtree descendant, repose sur des règles de subdivision. Leurs définitions constituent un point clef de l'algorithme. Elles sont basées sur la ré-estimation dynamique de propriétés statistiques et spatio-temporelles déduites des lots de données détectées et validées à l'issue de l'estimation précédente. Cette approche permet de réduire les temps de traitement tout en simplifiant la phase d'ajustement des paramètres. Comme l'approche hydrographique des données impose la validation systématique des résultats de l'algorithme, ce dernier simplifie cette phase en assortissant ses résultats d'une carte de confiance. Celle-ci permet de relever rapidement les points litigieux du levé ainsi que d'identifier les sites où les hypothèses de travail de l'algorithme ne semblent pas valides. Les performances de l'algorithme ont été estimées sur des lots de données artificielles et réelles.

ABSTRACT

Acquisition of bathymetric data with multibeam echo sounder is currently of common use. These systems allow increasing the soundings density while improving the resolution of the measures. Sporadic punctual errors present in large datasets have forced Hydrographic services to modify the whole issue of their validation procedures which were still now essentially turned to manual control. This paper describes, through a hydrographic point of view, a generalization of the algorithm presented at the Canadian Hydrographic Conference in 1998. Local modelization of the seabed – issued from the application of an M-estimator – is robustified with the help of a hierarchical approach dedicated to the automatic search of the optimal size of the estimation area. Its dynamic construction, analog to the one of a descending quadtree, is based on subdivision rules. Their definitions are key points of the new algorithm. Rules are built on dynamic estimations of both statistical and spatio-temporal properties deduced from currently detected datasets. Moreover, this approach enables to reduce the processing time while simplifying the parameters setting. As a confidence level map comes with the algorithm outputs, the systematic control of its results – which is a requirement linked to the hydrographic point of view – is greatly simplified. The aim of this map is to focus the operator to litigious areas as well as to identify areas where hypothesis of the algorithm may not be verified. The performances of the algorithm were estimated over artificial and real datasets.

1. INTRODUCTION

Depuis plus d'une dizaine d'années, la réalisation de levés bathymétriques à l'aide de sondeurs multifaisceaux est devenue pratique courante. Le principe de fonctionnement de ces systèmes repose sur la mesure d'un temps de parcours aller-retour d'une onde acoustique émise en direction du fond et la mesure de l'angle d'arrivée du signal réfléchi. La bathymétrie est déduite du temps de propagation de l'onde sonore. Les sondeurs multifaisceaux fournissent des mesures de grande résolution sur toute une fauchée perpendiculairement à la route du navire. Néanmoins, l'expérience montre que les lots de données recueillies comportent sporadiquement des données aberrantes. Ces erreurs peuvent s'expliquer par des phénomènes de réflexion multiple du signal, être imputables aux mauvaises conditions météorologiques (faible rapport signal sur bruit), à la présence des lobes secondaires, ou encore à celle de bulles devant les transducteurs. Bien que ces taux d'erreurs restent généralement très faibles – estimés à moins de 0.5 % dans une précédente étude [1] -, leur détection et élimination s'avèrent indispensables dans le contexte hydrographique où le service engage sa responsabilité en matière de sécurité de la navigation.

Le temps requis par l'épuration manuelle des erreurs ponctuelles pouvant dépasser celui nécessaire aux acquisitions, des algorithmes de validation automatique des données bathymétriques ont été proposés. Dans un cadre générique, la démarche des algorithmes rencontrés dans la littérature s'articule autour de trois étapes principales :

1. l'estimation de la ou des profondeurs en une position donnée ;
2. Optionnellement, l'évaluation de la qualité du processus d'estimation mis en oeuvre ;
3. l'application de règles de décision pouvant, lorsque c'est possible, statuer sur la validité ou non des sondes.

Au début des années 90, l'identification des erreurs ponctuelles s'appuie sur une description condensée des distributions de données à l'aide de moyenne et écart type pondérés (*C.f.* [15] et [4]). La validité de cette approche stochastique repose essentiellement sur la définition de son voisinage d'application. En 1995, Eeg [5] propose de construire un test statistique pour valider la taille du voisinage sur lequel les impulsions présentes dans les données bathymétriques sont détectées. Avec la mise en oeuvre de techniques de classification de données, comme celle proposée par Du dans [6], qui suggère de calquer la démarche des opérateurs, la taille des voisinages devient variable. D'autres, à l'instar de Hou dans [9], ont proposé d'affiner la description des erreurs ponctuelles (détection de cycles erronés par exemple ...). Cette démarche les a inévitablement conduit à proposer l'application en cascade de filtres sur les données. Ces filtres, algorithmiquement simples, peuvent, comme le propose Bongiovanni dans [10], commencer la validation des données dans le mode d'acquisition du capteur (*i.e.* cycle, faisceau) pour l'achever dans le mode géographique. Les principales améliorations qui ont ensuite suivies se sont orientées vers la robustification du processus de modélisation. Les techniques robustes telles que les M-estimateurs

(*C.f.* [2] et [3]), le krigeage robuste [7] ou le filtre de Kalman [8] ont été mises en oeuvre pour prendre en compte l'influence des erreurs ponctuelles dans la construction des modèles estimés localement. Toutefois, pour des impératifs de sécurité, la phase d'épuration automatique des données nécessite toujours une passe finale de validation faisant intervenir un opérateur. Dans ces conditions, la démarche en tant que telle peut être robustifiée en proposant à ce dernier une mesure de confiance du processus d'estimation, laquelle octroie la possibilité de ne pas se prononcer sur la validité d'une sonde (*C.f.* [11] et [8]). En délivrant une cartographie du niveau de confiance des validations, la technique d'épuration proposée ci-dessous s'inscrit pleinement dans cette démarche. En élargissant la démarche initiée dans [1], elle permet à l'opérateur de travailler plus efficacement car ce dernier peut focaliser son attention sur les points litigieux en opérant des recouvrements visuels.

Avec l'acquisition de sondeurs grands fonds, le SHOM s'est orienté vers une approche hybride pour valider en temps différé ses lots de données bathymétriques. Cette phase de validation reposait sur le contrôle manuel de lots de sondes douteuses résultant de l'application d'une procédure semi-automatique. A cette fin, un algorithme visant la validation automatique des données acquises par grands fonds a été développé par le SHOM [1, 2]. Celui-ci s'appuie sur l'analyse des résidus découlant d'une modélisation analytique locale du fond au moyen d'un estimateur robuste.

Bien qu'ayant démontré toute son efficacité pour la validation des données acquises par grands fonds, cet algorithme nécessitait un contrôle préalable de l'adéquation de ses paramètres globaux au jeu de données traité. C'est pourquoi il ne pouvait être aisément mis en oeuvre pour la validation de données acquises par très petits fonds en raison des très grands volumes de données à gérer. Il devenait alors impératif de concentrer l'attention des opérateurs sur des zones litigieuses pour tirer pleinement partie du gain d'efficacité apporté par les algorithmes automatiques. Par ailleurs, les tests menés devaient montrer que, sur certains types de reliefs, l'ajustement de l'un des deux paramètres de l'algorithme initial pouvait s'avérer déterminant. Si par grands fonds, cette difficulté pouvait être contournée en rejouant l'algorithme jusqu'à vérifier l'adéquation des paramètres aux reliefs, par petits fonds une telle démarche ne pouvait s'envisager. A l'inverse, proposer un découpage du levé en zones de reliefs homogènes pour limiter le contrôle des paramètres de l'algorithme à un sous-ensemble de données prélevées sur chaque zone ne pouvait être une solution acceptable lorsqu'il s'agit de répondre aux exigences de sécurité de la navigation.

L'algorithme de détection des erreurs ponctuelles que l'on propose ici s'adresse indifféremment aux données bathymétriques petit, moyen, et grand fonds. Il constitue une généralisation de celui développé initialement (*C.f.* [2] et [3]) et poursuit l'évolution amorcée dans [11]. Il tire profit de la cohérence spatio-temporelle des données pour adapter localement la taille des fenêtres d'estimation aux reliefs. Après un rappel du principe de base sur lequel s'appuie l'algorithme initial (§ 2.1), la deuxième section décrit l'approche hiérarchique proposée. Celle-ci repose sur une partition hiérarchique emboîtée dont la construction est dynamiquement pilotée

par un ensemble de règles reposant sur la caractérisation de propriétés statistiques et morphologiques déduites des lots de données détectées et validées. Sa mise en oeuvre est résumée dans la section 3. Elle vise à répondre aux besoins des hydrographes à savoir : (i) épurer automatiquement les données bathymétriques multifaisceaux, (ii) identifier les zones litigieuses d'un levé (*i.e.*, les zones de dysfonctionnement du sondeur, ou celles comportant des agrégats de détection potentiellement assimilable à des objets). La section 4 évalue les performances de l'algorithme sur des données semi artificielles ainsi que sur trois jeux de données réels choisis en fonction de leurs niveaux de difficultés.

2. APPROCHE PROPOSÉE

2.1 Bases méthodologiques

L'hypothèse de travail suppose que les mesures bathymétriques sont entachées (i) d'un bruit de mesure supposé suivre une loi de distribution normale et (ii) d'un bruit parasite supposé rendre compte de la présence des données. Dans ces conditions, après s'être donné une modélisation analytique locale de la bathymétrie ainsi qu'une technique robuste permettant son ajustement aux données, le coeur de la stratégie retenue repose sur la faculté d'assimiler les erreurs ponctuelles aux sondes non absorbées par ce modèle. Le modèle générique retenu permet d'exprimer localement la profondeur z en (x, y) comme une fonction polynomiale $z = f_p(x, y; \mathbf{a})$ d'ordre p dont les paramètres sont représentés par le vecteur des coefficients \mathbf{a} . En pratique, on se limite à l'ordre 2 ou 3 – soit 6 ou 10 paramètres. La modélisation locale des reliefs étant réalisée directement sur les données brutes, une technique d'estimation classique telle que celle des moindres carrées ne peut être mise en oeuvre en raison de la présence d'erreurs ponctuelles. L'estimation des paramètres du modèle nécessite l'introduction d'une norme quadratique robuste. La minimisation de cette norme repose sur l'introduction d'un M-estimateur. On retient un M-estimateur permettant d'effectuer l'optimisation au travers d'un processus itératif pondéré (ou *IRLS pour Iterative Reweighted Least Squares*) dont la construction repose sur la technique des moindres carrés généralisés.

Les références [2] et [3] décrivent en détail l'implémentation d'un M-estimateur appliqué à modélisation robuste de la bathymétrie. On en résume ici sa formulation algorithmique dans le cas d'une aire d'observation supposée contenir M sondes (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, M$. Soit $\hat{z}_i^{(j)}$ les profondeurs estimées à l'issue de l'itération j après estimation des paramètres minimisant l'erreur quadratique globale entre les observations z_i , pondérées par les poids $w_i^{(j-1)}$ déduit de l'itération précédente, et celles prédites par le modèle. Le traitement de la norme robuste s'opère par réévaluation progressive des poids sur la base des résidus $r_i^{(j-1)} = \hat{z}_i^{(j-1)} - z_i$ observés à l'issue de l'itération $j-1$. On retient le M-estimateur de Tukey. Dans la mesure où l'on dispose d'une estimation $\hat{\sigma}^{(j-1)}$ de l'écart-type du bruit gaussien, les poids $w_i^{(j)}$ requis en vue de l'itération j sont alors réestimés par la relation $w_i^{(j)} = \begin{cases} 1 - (r_i^{(j-1)} / \alpha \hat{\sigma}^{(j-1)})^2 & \text{si } |r_i^{(j-1)}| < \alpha \hat{\sigma}^{(j-1)} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$ Cette expression introduit le coefficient d'échelle α contrôlant le point de réjection adaptatif $\alpha \hat{\sigma}^{(j-1)}$ du M-estima-

teur. Le calcul du point de réjection repose généralement sur une estimation robuste $\hat{\sigma}$ de l'écart type du bruit gaussien par un L-estimateur du type MAD. En supposant le résidu moyen voisin de zéro, ceci revient à poser $\hat{\sigma}^{(j-1)} = 148 \text{ med}_i(|r_i^{(j-1)}|)$ où la médiane est calculée sur l'ensemble des résidus exprimés en valeur absolue.

Cette implémentation d'un M-estimateur présente deux avantages. Le premier se réfère à l'existence d'une fonction de poids ; laquelle permet, lorsque nécessaire, de rendre explicite le status de chaque sonde. Le second se réfère au traitement du point de réjection. La robustesse intrinsèque d'un M-estimateur étant à caractère semi-local, un aspect robuste plus global est apporté en repositionnant adaptativement le point de réjection à l'aide d'un L-estimateur (*C.f.* [12]). Par ailleurs, lors de la phase d'initialisation on pose généralement $w_i^{(0)} = 1$. Ce qui, toujours du fait de la robustesse semi-locale du M-estimateur, n'écarte pas le risque de voir des aberrations de fortes amplitudes acquérir une influence majeure sur l'estimation du modèle. Pour limiter le risque de masquage de telles erreurs ponctuelles, la phase d'initialisation effectuée, pour chaque sonde i , l'ajustement robuste d'un plan sur l'ensemble $N_G(i)$ de ses voisins – le voisinage $N_G(i)$ étant défini sur une fenêtre 3x3 définie dans le graphe d'adjacence cycles-faisceaux. Soit $\hat{z}_i^{(0)} = \text{med}_{j \in N_G(i)}(z_j)$ le plan ainsi estimé. Le résidu $r_i^{(0)} = \hat{z}_i^{(0)} - z_i$ associé à cette estimation permet alors de définir les poids initiaux $w_i^{(0)}$ à l'aide de la fonction de poids attachée à l'implémentation IRLS du M-estimateur – le point de réjection initial étant défini de manière à rejeter les 5 derniers centiles attachés au classement des résidus $|r_i^{(0)}|$ par ordre croissant.

Ainsi, en attribuant à chaque sonde un poids w_i assimilable à la probabilité que l'observation de la profondeur soit assimilable à une perturbation gaussienne de la profondeur réelle, le processus d'optimisation conduit à proposer une répartition naturelle des sondes en deux populations :

- Celles affectées d'un poids non nul (*i.e.*, les inliers). Elles apportent leur contribution à l'estimation des paramètres du modèle et obéissent à un processus aléatoire gaussien – et ce avec d'autant plus de vraisemblance que leur poids tend vers 1.
- Les sondes aberrantes (*i.e.*, les outliers), associées à un poids nul, identifiées comme représentantes d'une perturbation non gaussienne et considérées comme de potentielles détections.

L'estimation achevée, on dispose, pour l'aire d'observation retenue, non seulement d'une estimation du taux $\hat{\tau}$ de sondes potentiellement aberrantes, mais encore d'une estimation $\hat{\sigma}$ de l'écart type du bruit gaussien centré dont sont affectées les sondes validées.

En dehors du paramètre assurant sa convergence, cet algorithme de détection (voir détails dans [2]) comporte seulement deux paramètres nécessitant un contrôle par l'utilisateur : le facteur de sensibilité α et la taille L de l'aire d'observation retenue. Dans des conditions d'utilisation normales, le choix du facteur de sensibilité est peu critique. Il possède une valeur théorique optimale, $\alpha = 6$, dont la définition se réfère au cas de figure où il n'existe pas de sondes aberrantes.

2.2 Approche adaptative hiérarchique

La validité du principe général de l'approche de base exposée au paragraphe précédent repose sur une hypothèse de travail implicite. Celle-ci suppose que l'ensemble des profondeurs mesurées sur l'aire d'observation peut, compte tenu de la connaissance *a priori* du niveau maximum de bruit acceptable en situation normale, être modélisée par un polynôme du second ordre – ou du troisième ordre. Pour acquiescer de la souplesse, tout en minimisant les risques liés à l'usage d'un paramétrage peu pertinent, l'approche de base doit s'enrichir d'une stratégie de recherche automatique de la *taille optimale* de l'aire d'observation à laquelle sera appliqué le modèle local.

La figure 1 illustre la nécessité d'introduire une approche adaptative. Elle représente une surface créée artificiellement à partir d'un lot de données réelles. Autrement dit, seule la répartition spatiale des sondes a été conservée tandis que la profondeur de chaque sonde a été recalculée analytiquement. Les reliefs générés résultent de la superposition de quatre fonctions de la forme $z = k \exp(-((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2) / \lambda)$. Comme l'illustre la figure 1, l'inadéquation de la taille des cellules aux reliefs se traduit par la détection de sondes qui, bien que statistiquement assimilables à des erreurs ponctuelles, se présentent sous la forme d'agrégats. Ces derniers sont essentiellement localisés en bordure de cellules et reflètent uniquement les limitations intrinsèques du modèle polynomial. Les asymétries de leur distribution reflètent l'inhomogénéité de celle des sondes, que l'on observe sur les zones de recouvrement de fauchées adjacentes. Les agglomérats, représentés en couleurs pâles, découlent de l'application directe de la méthode de base [2] lorsque la taille L des aires d'observation est inadaptée – ici fixée à 10m. Les quatre pics gaussiens correspondent respectivement à $(k, \lambda) = (10, 100), (20, 100), (30, 100)$ et $(40, 100)$.

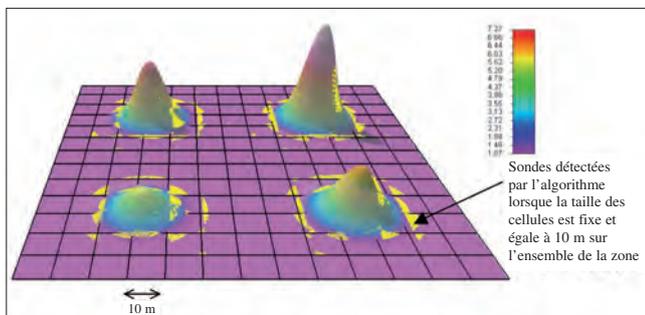


Figure 1 : Inconvénients d'une approche non adaptative

L'approche adaptative vise à rechercher, pour chaque région du domaine, la taille optimale L de la fenêtre d'observation. La recherche de cette *taille optimale* répond à deux principes généraux contradictoires :

- La taille d'une aire d'observation doit favoriser les échantillons de grande taille. Ceci garantit la fiabilité des critères statistiques permettant de classer les sondes suivant les deux populations introduites plus haut.
- Inversement, en présence de reliefs perturbés, l'aire d'observation doit rester de taille limitée de manière à garantir la validité du modèle morphologique local quadratique. Sinon, des sondes valides seront, du fait de la valeur élevée de leur résidu d'approximation, considérées comme aberrantes.

C'est pourquoi, afin de tenir compte du niveau de détail pouvant être représenté par le modèle polynomial, l'algorithme de base a été couplé à une approche multi-résolution adaptative. La stratégie d'exploration retenue est *descendante*. L'aire d'observation est subdivisée tant que le modèle ne permet pas d'absorber correctement les détails morphologiques des reliefs. Par construction, cette approche descendante favorise la retenue d'aires d'observation de grandes tailles. Pour une aire d'observation courante, le processus de subdivision est stoppé dès que les règles garantissant le respect de certaines hypothèses de travail sont validées. La principale difficulté est alors de définir des règles fiables permettant, pour une aire d'observation donnée, de statuer sur la *validité* de sa modélisation robuste. La description de ces règles fera l'objet du paragraphe suivant. La stratégie de subdivision de l'aire d'observation repose sur deux points :

(i) On définit un partitionnement fin du support à l'aide d'une grille 2D régulière à maille carrée de taille L_0 .

(ii) Un regroupement hiérarchique virtuel de ces cellules élémentaires est obtenu sur $n = 1, \dots, N$ niveaux par construction d'une partition hiérarchique emboîtée (*i.e.*, un quadtree où chaque aire donne naissance à quatre aires filles de tailles identiques). La base $n = 1$ de cette partition est ainsi constituée du partitionnement élémentaire L_0 . Au niveau n , la taille des aires d'observations L_n est égale à $2^{n-1} L_0$.

Cette procédure adaptative introduit seulement deux nouveaux paramètres : L_0 , la taille des cellules de la grille élémentaire et N , le nombre de niveaux de la partition hiérarchique. En se donnant préalablement un nombre minimal de sondes M_0 en dessous duquel il n'est plus possible de procéder fiablement à l'estimation robuste des paramètres du modèle sur l'aire considérée, le paramètre L_0 peut alors être déduit empiriquement d'une étude statistique de la distribution des sondes sur l'ensemble du lot de données (C.f. §3.2). Une valeur conseillée du paramètre L_0 peut donc être proposée à l'opérateur. Le nombre de niveaux hiérarchiques est, par nature, peu critique du moment où il est systématiquement défini par excès. La seule conséquence pratique d'un réel excès se traduira par un surcoût opératoire lié à des tests inutiles – car voués à l'échec – préalablement menés aux niveaux les plus élevés.

2.3 Diagnostic de validité d'une modélisation

Dans le contexte général de la procédure adaptative descendante, on se focalise ici sur la définition de règles contextuelles permettant de savoir s'il subsiste un doute quant à la validité de l'estimation des paramètres du modèle affectés au contenu de la cellule venant d'être examinée. Ces règles s'appuient sur des informations apportées par la modélisation robuste des reliefs de l'aire d'observation courante. Lorsque l'ensemble des règles disponibles ne permet pas de lever le doute, et si le niveau hiérarchique n de l'aire d'observation courante est supérieur à 1, l'aire sera systématiquement subdivisée et la procédure de modélisation sera récursivement, et indépendamment, reconduite sur les quatre aires filles. Dans le cas contraire, l'analyse du contenu de l'aire courante sera considérée comme achevée.

Les règles retenues réunissent plusieurs aspects :

- des aspects purement *statistiques* s'appuyant sur des estimations $\hat{\sigma}$ de l'amplitude du bruit et du taux $\hat{\tau}$ d'erreurs ponctuelles ;
- des aspects *temporels* qui, en exploitant les zones de recouvrement entre fauchées, traduisent le degré de concomitance des sondes détectées ;
- des aspects *spatiaux* qui évaluent l'importance et la répartition des *agrégats* de détections.

La condition nécessaire et suffisante pour décider de rejeter la modélisation courante sera qu'au moins une des cinq *règles d'invalidation* exposées ci-dessous délivre une réponse positive. En pratique, de manière à minimiser les temps de traitements, ces règles d'invalidation seront examinées par coût opératoire croissant. Telles qu'énoncées, ces règles supposent que les règles qui les précèdent ont chacune apporté une réponse négative.

2.3.1 Règle d'invalidation I

Il s'agit d'une règle statistique construite sur les sondes validées par la modélisation courante. La réponse à cette règle sera positive si l'écart type du bruit gaussien $\hat{\sigma}$ associée à l'estimation est supérieur à une valeur maximale théorique σ_{\max} liée aux conditions d'acquisition ou de traitement.

2.3.2 Règle d'invalidation II

Il s'agit d'une règle statistique construite sur les sondes invalidées par la modélisation courante. La réponse à cette règle sera positive si le taux de détection $\hat{\tau}$ est supérieur au maximum admissible τ_{\max} dans des conditions d'acquisition supposées normales.

2.3.3 Règle d'invalidation III

Il s'agit d'une règle spatiale se référant à l'importance relative des agrégats de détections. Son introduction découle naturellement des commentaires portés sur la figure 1. Lorsque le modèle analytique – ici un polynôme du second ordre – est inadapté aux reliefs, les sondes considérées comme aberrantes par le M-estimateur se regroupent en cluster. La mise en oeuvre de cette règle repose donc sur l'identification explicite d'agrégats de détections. La matérialisation des agrégats nécessite l'identification des composantes connexes et, par conséquent, l'introduction d'un graphe de connexité entre sondes – lesquelles étaient jusqu'à présent considérées comme décrivant un semi de points non structuré.

Un regroupement pertinent des détections nécessite de pouvoir rendre compte simultanément d'une *connexité spatiale* et d'une *connexité temporelle*. La dimension temporelle s'appuie sur le séquençage des mesures par le système d'acquisition du sondeur. Sa prise en compte revient à construire un graphe reliant les sondes en fonction de leur cycle et faisceau d'acquisition. Du fait des aléas attachés à la route de navigation (ex. effets de lacet, de roulis, etc), la proximité spatiale des sondes peut être décorrélée de celle inférée par le graphe de connexité temporelle. L'introduction du graphe de connexité temporelle peut alors apporter une

information complémentaire. Par ailleurs, l'exploitation de la connexité temporelle permet de réintroduire les sondes virtuelles correspondant aux blancs sondeurs. Traduisant des perturbations physiques au sein du capteur, ces sondes – qui, par nature, se retrouvent sans contrepartie dans le nuage de points – peuvent catalyser la formation de composantes connexes plus importantes en permettant de relier certaines détections entre elles.

L'algorithme de formation des composantes connexes opère par distribution récursive de labels suivant une technique de propagation de fronts au sein du graphe d'adjacence (voir la description détaillée d'une approche similaire dans [13]).

La figure 2 illustre le processus de formation des agrégats. Dans un premier temps, des agrégats de détections sont formés en examinant la connexité implicite définie par le sondeur. Comme précisé plus haut, les noeuds de ce graphe de voisinage incluent les sondes absentes. Lors du processus de formation des composantes connexes, certains de ces noeuds virtuels interviennent au même titre que ceux rattachés aux détections issues de la modélisation. En vue de cette opération, les noeuds virtuels distants, au sens du graphe de voisinage, de moins de d_V arêtes de la détection native la plus proche reçoivent provisoirement le status de sondes détectées. En réintroduisant les difficultés rencontrées par le sondeur pour effectuer une mesure, on établit ainsi des passerelles entre paquets de détections. Ce procédé permet de renforcer la consistance de certains agrégats de détections en présence de difficultés d'acquisition du sondeur.

Dans un second temps, les détections – lesquelles sont à présent dotées d'un identifiant les rattachant à une des composantes connexes déduites de la connexité temporelle – sont projetées sur un MNT classique construit sur l'aire d'observation courante. L'unique rôle de ce MNT est d'introduire une connexité spatiale susceptible d'apporter un niveau supplémentaire d'agrégation. Ceci n'est possible que dans la mesure où le processus formant les composantes connexes au sein du MNT tient compte de celles obtenues précédemment. Le pas du MNT est défini comme une fraction l_0 de la taille L_0 de la cellule de base (C.f. §3.2). Cette seconde étape, comme la précédente, n'établit pas de connexions entre sondes appartenant à des fauchées distinctes.

La réponse à cette règle sera positive s'il existe au moins un agrégat regroupant plus de A_{\max} détections.

2.3.4 Règle d'invalidation IV

Cette règle spatiale n'est applicable que si l'aire d'observation comporte des sondes issues de fauchées différentes. Les agrégats définis au §2.3.3 sont créés en établissant des connexions temporelles, pouvant être prolongées dans l'espace, mais ne se rattachent qu'à une même fauchée. Il s'agit, à présent, d'exploiter les éventuelles coïncidences spatiales d'agrégats entre fauchée. En effet, des agrégats de détections qui sont issus de deux fauchées distinctes et qui se recoupent révèlent, soit la présence d'un objet réel, soit celle d'une erreur de modélisation.

La réponse à cette règle sera positive s'il existe au moins deux agrégats superposables. Il s'agit d'une mise en correspondance de pixels.

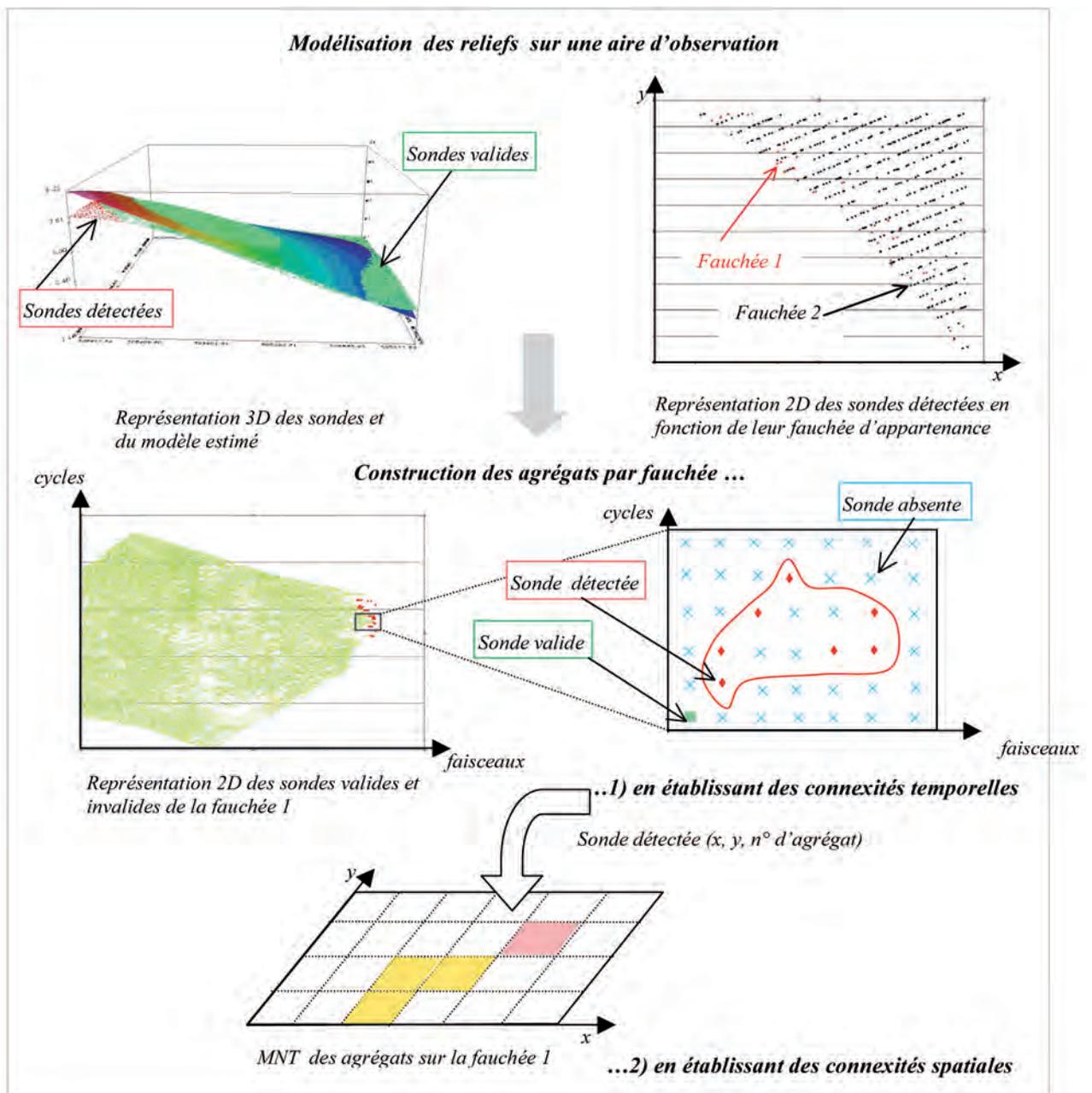


Figure 2 : Construction des agrégats

2.3.5 Règle d'invalidation V

On considère ici la présence d'agrégat. Les règles précédentes n'ayant délivré aucune invalidation, ces agrégats présentent nécessairement une taille inférieure à A_{max} . Contrairement aux objets réels ou aux insuffisances du modèle, les erreurs ponctuelles ne peuvent, par nature, avoir un emplacement fixe dans le temps. Dans la mesure où, par définition, ils n'intersectent pas d'agrégats de détections dans les autres fauchées, leur présence ne doit donc pas entraîner l'invalidation du modèle courant. Par contre, le cas particulier d'agrégats situés dans une région dépourvue d'intersection est, suivant ce principe, indécidable. Il convient donc d'invalider le modèle s'il existe des agrégats indécidables dont la taille est suffisamment remarquable pour constituer un possible objet réel.

La réponse à cette règle sera positive s'il existe au moins un agrégat isolé indécidable dont la taille est supérieure à A_{min} .

3. MISE EN ŒUVRE

3.1 Suivi cartographique de l'épuration

Conjointement au lot de données invalidées, l'algorithme proposé fournit automatiquement une cartographie des résultats de l'épuration réalisée. Ceci permet à l'opérateur de tirer pleinement partie de l'apport de l'algorithme automatique en focalisant son attention finale sur les zones suspectes – lesquelles représentent typiquement des objets ou des défaillances du modèle.

Sur la carte présentée à l'opérateur, les aires d'observation dont la taille finale découle d'un niveau hiérarchique $n > 1$ ont, par principe, été validées au cours du processus d'épuration. Toutes les sondes détectées sur ces aires ont alors été identifiées comme des erreurs ponctuelles probables. Un code de couleurs (Tableau 1) établit une classification de ces aires valides en fonction du nombre de détections et du nombre de fauchées qu'elles renferment.

Lorsqu'une aire d'observation se retrouve invalidée après avoir été examinée au niveau hiérarchique de base $n = 1$, la règle ayant conduit à cette décision est présentée à l'utilisateur. Le code de couleurs retenu (Tableau 1) permet de distinguer deux populations :

- Les aires rejetées suite à une invalidation générée par les règles I ou II. Elles exigent un contrôle systématique par l'opérateur car les éventuelles sondes aberrantes n'ont pu être identifiées. Ce cas de figure inclut les quelques cellules n'ayant pu être examinées en raison d'un nombre de sondes insuffisant (i.e., inférieur à M_0).
- Les aires identifiées comme douteuses suite à une invalidation émise par les règles III, IV ou V. Celles-ci peuvent, selon les cas de figure, nécessiter une validation manuelle. Toujours dans l'optique de simplifier la tâche de l'opérateur lors de la validation, une classification plus précise des résultats a été proposée. Elle identifie les aires, d'une part, selon qu'elles contiennent (i) un agrégat, (ii) un objet, (iii) une superposition d'agrégats et, d'autre part, en classifiant les détections suivant la polarité de leur valeur résiduelle. Par ailleurs, sur ces aires, le lot de sondes détectées et présentées à l'opérateur, est obtenu par seuillage, S_{det} , des taux de détection calculés en prenant en compte, pour chaque sonde, l'historique de ses N observations.

Cette classification répond aux exigences des hydrographes lorsqu'ils sont confrontés à la validation d'un levé. Les zones litigieuses doivent pouvoir être rapidement localisées. Superposées aux routes de navigation, la cartographie des aires d'observation rejetées doit alors révéler l'éventuelle présence d'erreur systématique. Par ailleurs, la localisation et la classification des aires d'observations douteuses doivent permettre à l'hydrographe de repérer et d'identifier tout agrégat de détections possiblement assimilable à un objet. Le code de couleur de la classification retenue est présenté sur le tableau 1.

3.2 Paramètres de l'algorithme

Ces paramètres sont au nombre de neuf et se divisent en trois groupes fonctionnels : ceux contrôlant le partitionnement hiérarchique des observations en terme de cellules, ceux contrôlant la modélisation robuste du contenu d'une cellule et, enfin, ceux pilotant la validation de la modélisation d'une cellule c'est à dire, la construction du partitionnement hiérarchique.

- Construction du partitionnement hiérarchique N, M_0, L_0 :
 N Nombre de niveaux hiérarchiques du partitionnement emboîté (quadtree). De manière à rester sans incidence sur la qualité des résultats, ce paramètre doit toujours être défini par excès (val. typ. 10).

M_0 Nombre minimal de sondes que doit inclure une cellule de base du quadtree. Sa valeur minimale théorique est imposée par le nombre de degrés de liberté du modèle de régression retenu – 6 (resp. 10) dans le cas du modèle d'ordre 2 (resp. 3). En pratique, pour un modèle polynomial d'ordre 2, M_0 est fixé par défaut à 10 sondes de manière à garantir un minimum de redondance de l'information lors de l'ajustement du modèle.

L_0 Arête des cellules de la partition de base du quadtree. De plus, on suppose que l'on dispose d'une estimation l_0 de la distance moyenne entre sondes voisines sur l'ensemble du lot de données – laquelle définit également la résolution du MNT temporaire sur lequel est construite la connexité géographique. La valeur-plancher de L_0 est alors voisine de $l_0 \sqrt{M_0}$.

- Contrôle de la modélisation robuste : α
 α Coefficient d'échelle déterminant le point de réjection du M-estimateur. En l'absence de mesures aberrantes et de défaillances du modèle, il possède une valeur théorique optimale égale à 6. Cette valeur est celle fixée par défaut. Suivant les impératifs et les compromis propres à l'épuration, son augmentation permettra de privilégier la minimisation des fausses détections. À l'inverse, sa diminution permettra de privilégier la minimisation du nombre des détections manquées.
- Validation statistique d'une modélisation : α_{max}, τ_{max}
 α_{max} Ecart-type maximum du bruit de mesure gaussien dont peuvent être affectées les mesures des sondes validées. Cette valeur découle d'une estimation de la précision du sondeur ou des traitements (val. typ. : ordre défini par la norme S44 en fonction de la profondeur).
 τ_{max} Taux maximum de détection. La valeur retenue se réfère au taux d'erreurs ponctuelles admissible dans des conditions d'acquisition normale. Comme le paramètre précédent, le choix de cette valeur découle des connaissances que l'on a du sondeur ou du protocole de validation du levé (val. typ. 5 %).
- Validation spatio-temporelle d'une modélisation : A_{min}, A_{max}, d_v
 A_{min} Population minimale que doit contenir une composante connexe de sondes détectées pour être considérée comme un agrégat (val. typ. 3 sondes).
 A_{max} Taille à partir de laquelle un agrégat devient suffisamment important pour être considéré comme un objet (val. typ. 9 sondes [14]).
 d_v Nombre fixant, en nombre d'arêtes au sein du graphe d'adjacence des cycles et faisceaux, le rayon d'influence d'une détection. Ce rayon permet de sélectionner les noeuds virtuels qui seront temporairement considérés comme des détections lors de la formation des agrégats (val. typ. 1).

En définitive, les seuls paramètres nécessitant un éventuel ajustement des valeurs par défaut proposées ci-dessus sont, d'une part, α_{max}, τ_{max} , dont les amplitudes témoignent principalement des conditions matérielles du levé bathymétrique examiné et, d'autre part, du couple A_{min}, A_{max} qui reflète indirectement le niveau d'attention que l'on portera aux éventuelles anomalies morphologiques locales dont peuvent rendre comptent certains agrégats.

4. ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE L'ALGORITHME

4.1 Surfaces artificielles

Les performances de l'algorithme ont été évaluées sur trois surfaces artificielles construites à partir d'un lot de données réelles – d'environ 500 000 sondes - acquises à l'aide du sondeur ATLAS FANSWEEP20 sur des fonds de 1 à 7 m. La figure 3 présente les routes de navigation et recouvrements entre fauchées sur la zone considérée.

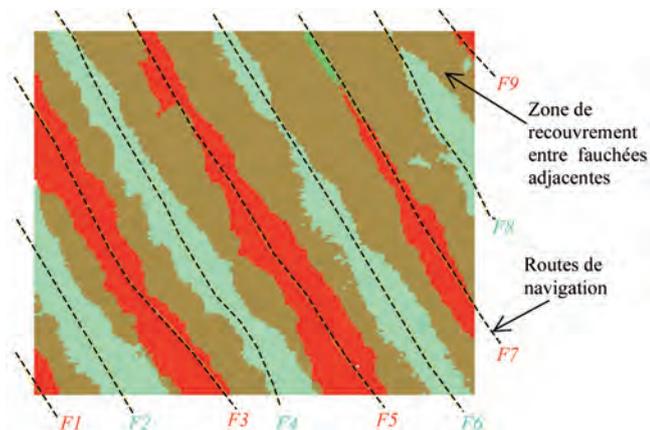


Figure 3 : Modélisation de la couverture des fauchées FANSWEEP20 présentes sur la zone.

Les positions (x, y) , numéro de cycle et de faisceaux des sondes ont été conservés. Les profondeurs ont été recalculées soit à l'aide d'une expression analytique soit par interpolation bilinéaire des noeuds d'un MNT lissé décrivant des reliefs réels.

Le bruit du sondeur a été modélisé en ajoutant aux surfaces ainsi créées un bruit gaussien de moyenne nulle et d'écart type σ . Des erreurs ponctuelles ont été injectées aux lots de données suivant une loi uniforme, selon un taux variable.

L'évaluation des performances de l'algorithme s'appuie sur :

- *le taux de bonne détection* : défini comme le rapport du nombre de sondes invalides détectées au nombre de sondes invalides à détecter ;
- *le taux de détection abusive (ou taux de fausse alarme)* : défini comme le rapport du nombre de sondes valides détectées au nombre de sondes détectées ;

- *le taux de cellules acceptées* : lequel reflète la fraction de la charge de travail initiale dont l'opérateur se retrouve dégagé ;

- *le taux de cellules rejetées* selon la classification définie au paragraphe §3.1.

On injecte aux surfaces S0, S1, S2 (C.f. Fig. 4) préalablement bruitées ($\sigma = 5\text{cm}$) des erreurs ponctuelles selon un taux croissant allant de 1 à 9 %. Les paramètres de mise en oeuvre de l'algorithme sont identiques, quelque soit la surface testée, et égaux à : $L_0 = 1\text{ m}$, $N = 10$, $\alpha = 4$, $\sigma_{\text{max}} = 12\text{ cm}$, $\tau_{\text{max}} = 10\%$, $A_{\text{min}} = 4$, $A_{\text{max}} = 9$. La taille L_0 des cellules de la grille élémentaire a été fixée à partir des cartes de densité présentées sur la figure 5. Les résultats des tests sont présentés sur la figure 6. Les courbes représentées en bleu correspondent à une réponse optimale de l'algorithme étant donné que la surface S0 correspond au modèle présumé. L'augmentation du taux d'erreurs ponctuelles se traduit par une augmentation des subdivisions qui entraîne la prise de décision sur des niveaux hiérarchiques plus bas. Lorsque le taux d'erreurs ponctuelles représente moins de 5 % du lot de données, le taux de cellules rejetées par l'algorithme pour lesquelles un contrôle *a posteriori* s'avère nécessaire est inférieur à 5 %. Les tests ont par ailleurs montré que le taux de bonne détection, initialement de 98.95 %, atteignait encore 96.05 % lors que le taux d'erreurs ponctuelles était fixé à 9 %, et qu'à l'inverse, le taux de fausse alarme augmentait pour passer de 0 % à 1.59 %. La figure 6 montre un comportement différent de l'algorithme pour la surface S2 sur laquelle les reliefs marins présentent une forte rugosité. L'augmentation du taux de bonne détection avec le taux d'erreurs ponctuelles s'explique par une plus fréquente exploration des niveaux hiérarchiques inférieurs provoquée par l'analyse spatio-temporelle des détections (C.f. figure 7).

4.2 Reliefs réels

L'exploitation des résultats de l'algorithme à travers les cartes de confiance qu'il produit (voir conventions §3.1) est illustrée sur trois lots de données multifaisceaux, choisis pour la diversité de leurs reliefs. Le lot de données 1 a été acquis sur une zone de pinacles coralliens par fonds de 3 à 13 mètres. Le second lot de données est constitué d'un fond rocheux classique des abords de la Bretagne.

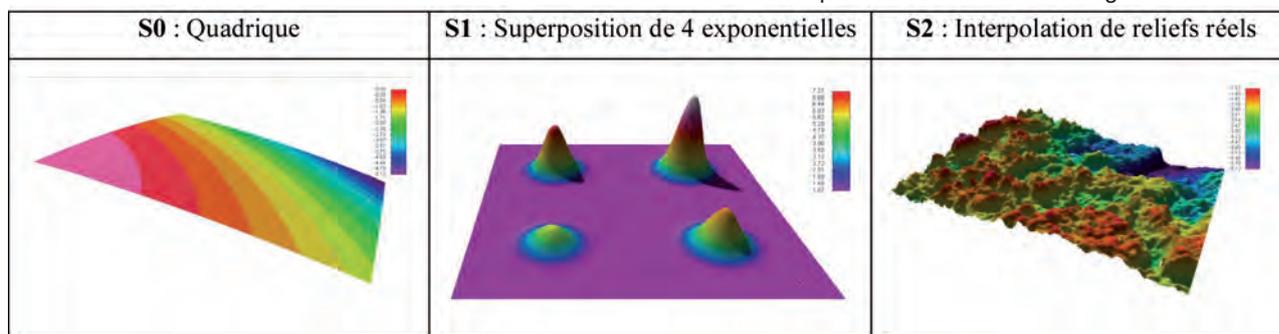


Figure 4 : Surfaces artificielles

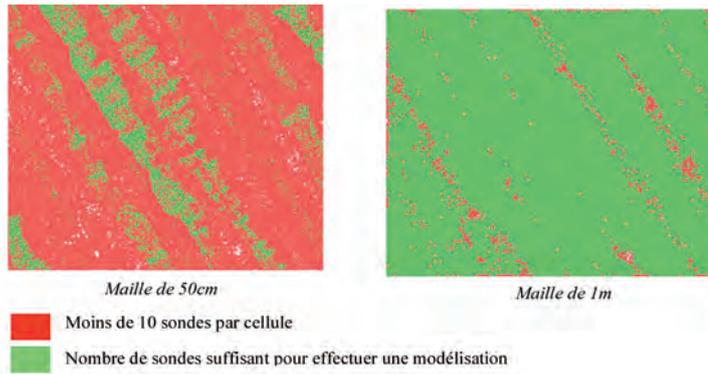


Figure 5 : Cartes de densité

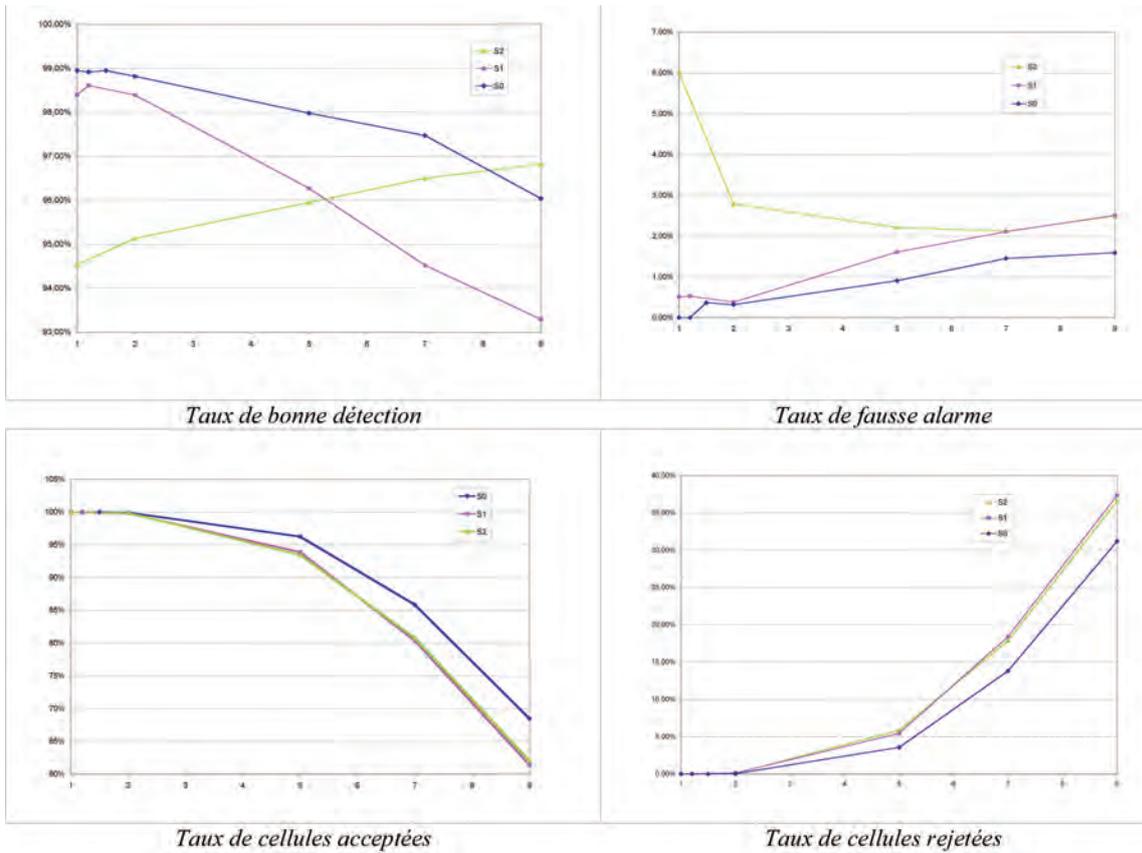


Figure 6 : Evaluation des performances de l'algorithme sur les surfaces S_0 , S_1 , S_2 en fonction du taux d'erreurs ponctuelles

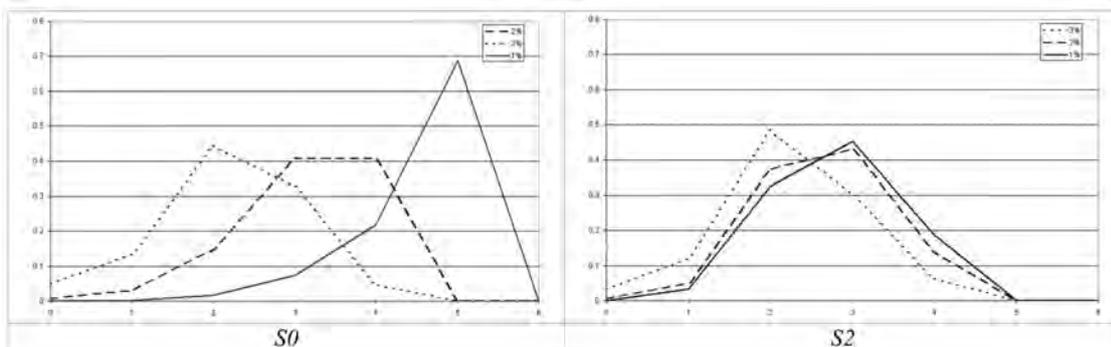


Figure 7 : Répartition des cellules par niveau hiérarchique en fonction des taux d'erreurs ponctuelles

Le lot 3 a été acquis par grands fonds et testé en raison de la présence des structures morphologiques variées qu'elle contient (faille au nord de la zone, pockmark au centre ..)

Les reliefs et cartes de confiance associées sont présentés sur la figure 8. La taille des cellules reflète l'étendue des estimations où la modélisation des reliefs par le modèle a été validée. Les cellules de taille L_0 correspondent à une observation complète des N niveaux hiérarchiques. Le code de couleurs (C.f. §3.1) utilisé répertorie les cellules en trois classes : les cellules acceptées (en gris), les cellules rejetées (en rouge) et les cellules douteuses. Les structures morphologiques présentes sur les trois reliefs testés provoquent un émiettement des cellules à leur approche. Sur le lot 1, si les ruptures de pentes liées aux pinacles coralliens les plus abrupts exigent un contrôle a posteriori des opérateurs, plus de 96 % de la surface globale du levé a toutefois été validée par l'algorithme. Sur le lot 2, la carte de confiance met en évidence la présence d'erreurs systématiques : les cellules rejetées par l'algorithme sont pratiquement toutes localisées sur les zones de recouvrement de deux fauchées. Malgré le large spectre de sa morphologie, l'épuration des données du lot 3 réduit le contrôle a posteriori à moins de 1 % de l'aire couverte par le levé. Comme pour le lot 2, ces aires résiduelles trahissent la présence d'erreurs systématiques.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Même s'ils demandent à être confirmés sur un plus grand nombre de lots de données réelles, les résultats des tests présentés dans cet article sont encourageants. Ils soulignent la robustesse de l'algorithme, ainsi que sa facilité de mise en oeuvre, tant du point de vue de l'ajustement des paramètres que du point de vue de l'exploitation et de l'interprétation des résultats. Le faible surcoût opératoire qu'entraîne la validation des modélisations est largement compensé par l'allègement des tâches de contrôle a posteriori habituellement imparties aux opérateurs.

RÉFÉRENCES

[1] N. Debes, "Typologie des erreurs les plus courantes sur les sondes des sondeurs multifaisceaux Simrad et leur impact sur la qualité des produits", Rapport d'étude NO 007 / 97, Mai 1997.

[2] N. Debes, X. Freulon, C. Mevel, "Application d'un estimateur robuste à la détection des erreurs ponctuelles dans les données bathymétriques", *Canadian Hydrographic Conference, CHC'98*, Victoria, (Mars 1998).

[3] N. Debes, H. Bisquay, "Automatic detection of punctual errors in multibeam data using a robust estimator", *International Hydrographic Review*, LXXVI (1), pp. 49-63, Mar. 1999.

[4] D.R. Herlihy, T.N. Stepka, T.D. Rulon, "Le filtrage des sondes erronées dans les sondages multifaisceaux", *International Hydrographic Review*, LXIX (2), Sept. 1992.

[5] J. Eeg, "On the identification of spikes in soundings", *International Hydrographic Review*, LXXII (1), Mar. 1995.

[6] Z. Du, D. Wells, L. Mayer, "An approach to automatic detection of outliers in multibeam echo sounding data", *The Hydrographic Journal*, No. 79, Jan. 1996.

[7] P. Bottelier, C. Briese, N. Hennis, R. Lindenbergh, N. Pfeifer, "Distinguishing features from outliers in automatic kriging-based filtering of MBES data: a comparative study", In Pre-Proceedings of geoENV'04, *the Fifth European Conference on Geostatistics for Environmental Applications*, 2004.

[8] B.R. Calder, L.A. Mayer, "Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data", *Geochemistry Geophysics Geosystems*, Vol. 4, No. 6, 2003.

[9] H. Hou, L.C. Huff, L. Mayer, "Automatic detection of outliers in multibeam echo sounding data", *US HYDRO*, 2001.

[10] C.B. Lirakis, K.P. Bongiovanni, "Outlier detection for swath bathymetric data sets", *Oceanic Imaging Conference*, 2000.

[11] N. Debes, P. Michaux, "Détection automatique d'erreurs ponctuelles présentes dans les données bathymétriques multi-faisceaux petits fonds", *Proc of Canadian Hydro. Conf., CHC'02*, Toronto, 2002, 17p.

[12] F. Hampel, "*Robust statistics : a brief introduction and overview*", Research Report, No. 94, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich, Mar. 2001.

	Nombre de sonde	Type de données multifaisceaux	Profondeurs moyennes	Paramètres de l'algorithme	Nombre de sondes détectées	Taux de cellules acceptées
1	589 820	SIMRAD EM3000	3m - 13m	L_0 : 1m Epuration à l'ordre spécial	2255 (0.38 %)	96.81 %
2	3 126 244	SIMRAD EM1002	37m -52m	L_0 : 3m Epuration à l'ordre 1	4971 (0.16 %)	95.80 %
3	558 732	SIMRAD EM120	1790m - 4690m	L_0 : 100m Epuration à l'ordre 2	1836 (0.31 %)	99.22 %

Tableau 1 : Description des lots de données réels testés, des paramètres et résultats de l'algorithme.

[13] N. Debesse, H. Bisquay, "Detection of the insonification area of a multibeam echo-sounder using a front propagation", *International Hydrographic Review*, LXXVI (2), pp. 81-91, Sept. 1999.

[14] J.H. Clarke, "Provisional Swath Sonar Survey Specifications", TH, Technical Report #2, Aug. 1999.

[15] C. Ware, W. Knight, D. Wells, "Memory intensive statistical algorithms for multibeam bathymetric data", *Computers & Geosciences*, Vol. 17, No. 7, pp 985-993, 1991.

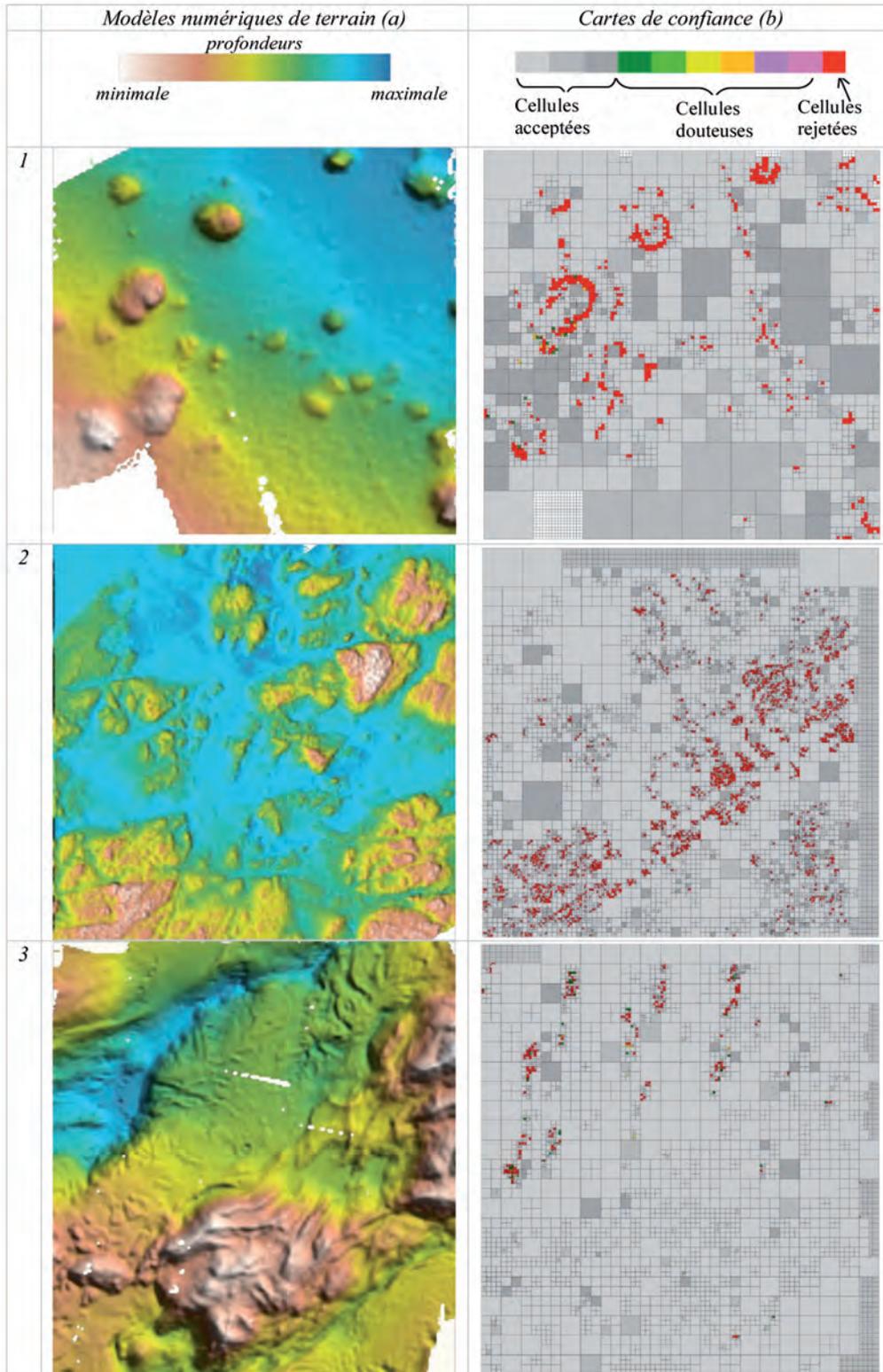


Figure 8 : Cartes de confiance (b) résultant de l'application de l'algorithme d'épuration sur 3 lots de donnée réelles (a).

DE LA CLASSIFICATION DES SÉDIMENTS À LA CARTOGRAPHIE DE LA NATURE DES FONDS MARINS

par Thierry GARLAN, ingénieur sur contrat
Service hydrographique et océanographique de la marine

RÉSUMÉ

La cartographie des sédiments demeure le résultat d'une expertise réalisée sur des jeux de données, et se trouve être une forme de modélisation empirique. Mais, contrairement aux autres domaines de l'océanographie, les facteurs à modéliser sont trop nombreux et complexes pour pouvoir être assimilés dans une carte unique ou dans un modèle numérique. Nous faisons ici l'analyse des progrès réalisés dans ce domaine depuis la première carte sédimentaire publiée par le Service Hydrographique en 1897. Après avoir étudié les différentes classifications de plusieurs centaines de cartes sédimentaires d'origines très variées, il apparaît que les différences observées (d'un pays à l'autre, d'un laboratoire à l'autre, voire de différentes cartes issues d'un même laboratoire) proviennent, dans la grande majorité des cas, de différences d'objectifs. Les autres différences sont issues du système de mesure utilisé, de la latitude (particularités polaires et tropicales) et de la profondeur (classifications du domaine terrestre, des petits fonds et du domaine océanique).

ABSTRACT

Sedimentary maps are the result of specific expert evaluation, based on acoustic data and ground truth, which is a kind of empirical modelling. At the opposite of the other oceanographic sciences, the sedimentological data are too complex and too large to be included in a unique map or in a numerical model. We present in this paper research focused on the progress realized in sedimentology since the first sedimentary map published by the SHOM in 1897. Study of the classifications used over the world for hundred of different sedimentary maps, shows differences in each country, for each publishers, ..., which are the result of the adaptation of the map to the different needs. The other differences come from the acquiring systems, from the latitude (polar, tropical sediments, ...) and from the depth (classification for coast, continental platform and deep oceanic zones).

1. INTRODUCTION

La sédimentologie, comme les autres sciences, est affectée d'une forme de morcellement de l'information, mais elle bénéficie par ailleurs d'une diversification des techniques mises en oeuvre, et d'un accroissement des interactions avec les autres sciences de l'océanographie. A cela s'ajoutent des problèmes plus spécifiques aux sciences de la terre tels que les problèmes d'échelles, les incertitudes sur la datation des événements et l'absence de normalisation.

Cette science est vaste et nous nous limiterons dans le présent exposé à la sédimentologie des fonds marins des plateformes continentales. Si l'on tend progressivement vers une normalisation des structures sédimentaires, une telle démarche reste à faire pour le nom des sédiments. Cet aspect est un point très important, car il engendre des problèmes pour la représentation cartographique ; dans le cadre de la modélisation numérique, la terminologie et les classifications des structures sédimentaires et des noms de sédiments doivent être parfaitement normalisés. Cela pose plus de problèmes encore dans les zones de recouvrement avec les autres sciences car de la biologie à la géoacoustique, en passant par la dynamique sédimentaire, un même nom peut représenter des sédiments très différents.

La cartographie des sédiments demeure le résultat d'une expertise réalisée sur des jeux de données, et se trouve être une forme de modélisation empirique. Mais, contrairement aux autres domaines de l'océanographie, les facteurs à modéliser sont trop nombreux et complexes pour pouvoir être assimilés dans une carte unique ou dans un modèle numérique. Nous allons faire le constat des progrès réalisés dans ce domaine depuis la première carte sédimentaire publiée par le Service Hydrographique en 1897.

Après avoir développé une cartothèque contenant plusieurs centaines de cartes sédimentaires d'origine très variées, nous avons étudié les différentes classifications utilisées et recherché l'intérêt de chacune d'entre elles. Il apparaît que les différences observées (d'un pays à l'autre, d'un laboratoire à l'autre, voire de différentes cartes issues d'un même laboratoire) proviennent, dans la grande majorité des cas, de différences d'objectifs.

Les autres différences sont issues du système de mesure utilisé, de la latitude (particularités polaires et tropicales) et de la profondeur (classifications du domaine terrestre, des petits fonds et du domaine océanique). La présente synthèse est le premier pas nécessaire pour atteindre une vision générale de la complexité des fonds et des difficultés rencontrées pour les représenter. Dans un prochain article nous décrirons l'apport et le développement des bases de données et de la typologie des fonds permettant de caractériser les produits du futur.

2. LES APPLICATIONS DE LA SÉDIMENTOLOGIE MARINE

2.1. La sédimentologie et l'hydrographie

Le rapport du groupe d'expert des Nations Unies de septembre 1979 établit que « l'hydrographie est la science qui consiste à mesurer et à représenter les paramètres qui sont nécessaires pour décrire la nature et la configuration précises du fond, sa relation géographique aux masses ter-

restres adjacentes ainsi que les caractéristiques et la dynamique de la mer ». Si la première partie est très proche de la définition de la sédimentologie marine, la seconde concerne des branches des mathématiques (géodésie) et de la physique (océanographie). L'hydrographie est née du besoin de produire des cartes pour le navigateur ; ce faisant, les hydrographes ont joué un rôle capital dans le développement des activités des sciences de la mer (Abbasi, 1989). Dans le domaine de la sédimentologie on s'aperçoit que toutes les techniques de dragues, bennes, carottiers au XIX^e siècle, et plus récemment le sonar latéral, ont été développées soit pour les applications militaires, soit pour les services hydrographiques. La sédimentologie, qui constituait initialement une activité importante des services hydrographiques, a été délaissée au profit de la bathymétrie à partir des années 1950, c'est-à-dire lorsque les sondeurs acoustiques ont permis d'acquérir des données continues de la profondeur alors que la sédimentologie exigeait de multiples stations. Avec l'arrivée de nouveaux systèmes acoustiques, porteurs d'informations sur la nature des fonds marins (sonars latéraux, sondeurs multifaisceaux, systèmes de classification des fonds), la sédimentologie a connu un regain d'activité.

L'Organisation Hydrographique Internationale préconise, dans ses spécifications sur les normes en matière de levés hydrographiques, de répartir les échantillonnages de sédiments de 10 fois l'espacement entre les profils pour les profondeurs inférieures à 200 mètres, avec une densité d'échantillonnage accrue dans les zones de mouillage. L'application de telles règles impliquerait le prélèvement chaque année de plusieurs milliers d'échantillons de sédiments par les services hydrographiques. L'utilisation simultanée de systèmes acoustiques d'imagerie et de classification des fonds permet désormais de réduire ce nombre de prélèvements. Mais la fusion des données acoustiques et des prélèvements, mise en œuvre depuis une vingtaine d'années par les sédimentologues, ne s'est pas accompagnée de la nécessaire normalisation de la représentation cartographique qui aurait dû accompagner cette évolution.

2.2. Les besoins en produits sédimentaires

En premier lieu il importe de définir, parmi les usagers de la mer, ceux pour qui la connaissance de la sédimentologie des fonds marins est importante ; limitant cette étude à la plateforme continentale nous dénombrons ainsi les huit applications suivantes :

- Dès le XIX^e siècle, les sédimentologues recherchaient en mer des analogies entre les structures sédimentaires actuelles et les formations géologiques anciennes, qui ne peuvent le plus souvent être approchées que par des affleurements géologiques très partiels ou des forages. La granulométrie et la nature des particules, la forme des structures sédimentaire, ... sont autant de facteurs pouvant expliciter les formations anciennes.
- La connaissance des fonds est primordiale pour la pêche et l'étude de la vie du benthos. Car la nature des sédiments marins et leur dynamique qui influent sur la quantité de matière organique piégée, les propriétés des fluides interstitiels et les phénomènes physico-chimiques, sont autant de paramètres abiotiques primordiaux dans le cycle de la vie sous-marine.

- Une carte marine doit fournir les informations sur le point et la route. La carte doit permettre le report du point à la mer et, conjointement, elle doit fournir la profondeur d'eau et la nature du fond correspondant à cette position, sans que le navigateur ait à sonder pour les connaître. La nature des fonds servira alors à définir : la route la plus sûre, les secteurs à risque, ainsi que les zones où les conditions d'ancrage seront favorables.
- Pour la pose et le maintien en conditions opérationnelles d'infrastructures (pipe-lines, câbles sous-marins, hydroliennes, plateformes, ...) la connaissance de la nature des fonds et de la dynamique sédimentaire est primordiale, car il faut se prémunir contre l'enfouissement voire, dans certains cas, contre la mise à l'affleurement.
- Pour l'extraction de sables et granulats, il faut disposer des informations précises sur l'épaisseur de la formation à exploiter, son extension, la nature et la variabilité du sédiment, et la dynamique sédimentaire régionale. Les besoins sont peu différents pour la protection des côtes et le rechargement des plages.
- L'enfouissement des objets et leur détection concernent les épaves anciennes, les restes de combats navals, bombes, obus et mines des guerres passées ou des conflits actuels. L'action des courants, de la houle, le poids de l'objet, sa forme, ... sont autant de critères ayant un impact sur l'enfouissement, mais le critère déterminant est la nature du fond et la profondeur du premier niveau induré constituant la limite du phénomène.
- Pour la transmission à distance d'images ou de sons en domaine sous-marin, pour la réalisation des modèles de courants du plateau continental et pour les modèles de déferlement des houles, la nature des fonds transcrite en terme de rugosité joue un rôle important pour que ces modèles tendent vers des résultats réalistes.
- La modélisation acoustique et par voie de conséquence l'utilisation de systèmes de mesures acoustiques repose sur une connaissance des sédiments, avec une résolution et une épaisseur variant selon la fréquence et l'angle d'incidence des systèmes acoustiques concernés.
- le plateau continental, limité par les profondeurs de 20 à 200 mètres, est mal connu, soit parce que l'on ne dispose à son sujet que de données éparses, soit parce qu'il est toujours visualisé à de petites échelles, il est le plus souvent décrit comme une surface quasiment plane aux reliefs modestes, érodés par les dernières glaciations et empâtés de sédiments apportés par les fleuves. Cette approche, vraie à l'échelle globale ou régionale, est erronée lorsque l'on accroît la résolution. Le plateau continental est un domaine parfois très changeant dont la dynamique a été évoquée depuis plusieurs décennies, mais que l'on ne peut effectivement étudier que depuis l'utilisation récente de la localisation satellitaire et de l'imagerie acoustique. La connaissance de la sédimentologie du plateau continental français peut être considérée comme médiocre, puisque de nouvelles structures sédimentaires (bancs et dunes de sables, pockmarks, affleurements rocheux, zones sédimentaires,...) sont découvertes à chaque nouveau levé, même pour des secteurs situés à quelques milles seulement des côtes. La caractérisation de la distribution sédimentaire de la totalité du plateau continental français à l'échelle du 1/50 000 ne peut être envisagée actuellement; il faudrait, avec les moyens actuels, plusieurs décennies pour pouvoir la réaliser ;
- le mieux maîtrisé est le domaine océanique. Il serait excessif de prétendre que les grands fonds sont parfaitement connus, mais une cartographie de grande qualité sur la nature des fonds de vastes secteurs de l'Atlantique nord peut être réalisée au 1/500 000, alors que ce n'est pas le cas de nombreuses plateformes continentales. Les grandes avancées réalisées sur les systèmes de mesure et sur la compréhension des processus de mise en place des sédiments océaniques, ont entraîné d'énormes progrès sur la connaissance des grands fonds. Ce domaine a de plus bénéficié des grands programmes ODP, DSDP, ... mais aussi d'études telles celles liées à la recherche du Titanic, des nodules polymétalliques et à la pose des câbles transocéaniques. De plus, la lenteur de la sédimentation dans la majeure partie des océans, donne une valeur séculaire aux mesures réalisées par grands fonds.

Ces domaines sont différents de par leur histoire, les processus sédimentaires, l'hydrodynamisme, ... Les méthodes d'études et les applications étant différentes, les classifications de sédiments et cartes sédimentaires sont également différentes dans ces trois domaines. Nous avons limité la présente étude au domaine de la plateforme qui est celui qui présente la plus grande diversité et le plus d'intérêt.

3. LA CARACTÉRISATION DES SÉDIMENTS

3.1. Les domaines sédimentaires

Le domaine marin peut être subdivisé en trois domaines principaux :

- le domaine littoral, avec des profondeurs inférieures à 20 mètres, est rendu complexe par l'existence d'interactions nombreuses entre l'action des marées, celle des houles et l'activité humaine. De multiples études sont ainsi menées pour la protection du littoral, la prévention des risques (inondations, pollutions, catastrophes naturelles), les aménagements (portuaires, touristiques, industriels), et l'exploitation des ressources vivantes et minérales ;

3.2. Apports de l'évolution des techniques

Tous les littoraux des côtes françaises métropolitaines et d'outre-mer ont été hydrographiés au plomb suiffé entre les années 1820 et 1940. Ces levés étaient effectués selon un maillage très serré à proximité des côtes : les points étaient alors souvent distants de seulement 20 à 40 mètres et les profils de 50 à 100 mètres. Avec plusieurs millions d'annotations de nature de fond, ces années constituent une période faste de la caractérisation des sédiments marins. Avec l'arrivée des sondeurs acoustiques, une distorsion s'est instaurée entre les données de la bathymétrie et de la sédimentologie. Il faut attendre l'arrivée des sondeurs multifaisceaux imageurs et des systèmes de classification supervisée des fonds, dans les années 1990, pour que ces deux domaines puissent être de nouveau couverts par un système d'acquisition unique.

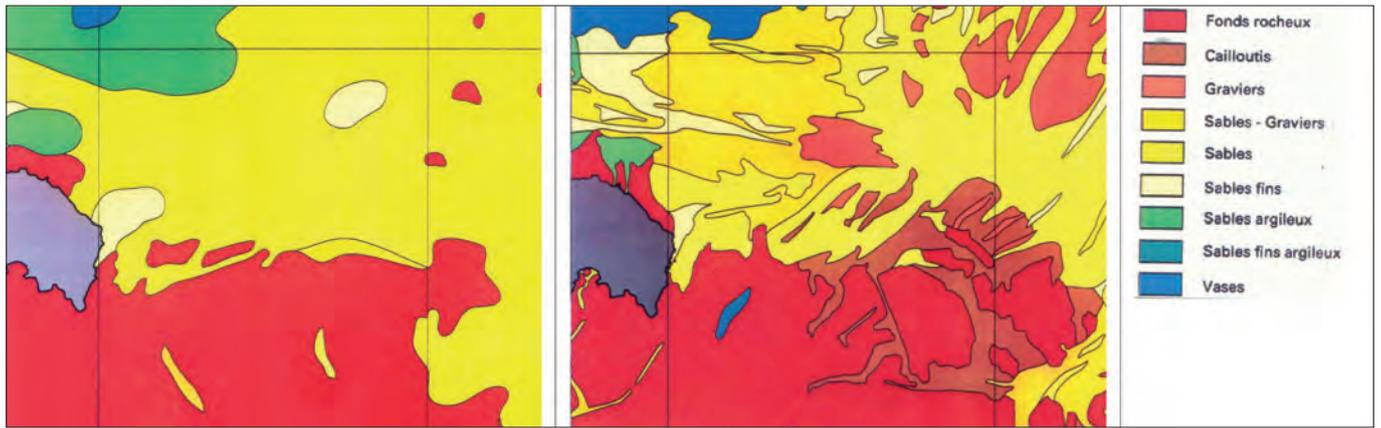


Figure 1 : Evolution de la connaissance entre 1972 et 1994, exemple de la carte sédimentaire de Lorient (1972, carte à 1/100 000 et 1994 à 1/50 000)

La figure 1 montre bien l'étendue des progrès de la connaissance par l'apport des nouveaux systèmes d'acquisition, mais aussi et surtout par une approche différente des méthodes de cartographie des sédiments. La cartographie des fonds peut ainsi être beaucoup plus précise avec les nouvelles techniques d'imagerie et de classification dans la mesure où des prélèvements ont été utilisés pour calibrer ces données. Il est également primordial de disposer d'une expertise permettant de fusionner dans le modèle sédimentaire: les données, la morphologie et l'hydrodynamisme.

4. DIVERSES CLASSIFICATIONS POUR DIFFÉRENTES CARTES SÉDIMENTAIRES

Un sédiment est le produit de l'érosion par les eaux douces et les glaces, l'abrasion par la mer ainsi que la déflation par le vent. Les particules ainsi formées, après une migration de quelques heures à quelques milliers d'années, se trouvent

intégrées dans un mélange de débris de roches (lithiques) et biologiques, qui évoluera selon l'hydrodynamisme. En première approximation, plus les particules sont fines et plus elles sont susceptibles d'avoir parcouru de grandes distances. Mais il n'existe en fait pas de règle, et des blocs de plusieurs mètres cubes ont parfois parcouru plusieurs centaines de kilomètres. De tels blocs et des galets allochtones sont par exemple rencontrés au centre de la mer de la Manche ; ils ont été apportés par des glaces flottantes lors de la dernière période glaciaire à haut niveau marin. Ces blocs fossiles vont se trouver en présence de sédiments conformes aux courants actuels, comme par exemple les rubans de sables de la figure 2. L'hétérogénéité ainsi obtenue sera encore augmentée par l'ajout de particules d'origine biologique (débris de coquilles et tests d'organismes) qui viendront se mélanger aux sédiments et dont la taille peut être plus grande que celle permise par les courants locaux. Plus les origines s'ajoutent et plus le sédiment obtenu pourra être hétérogène.

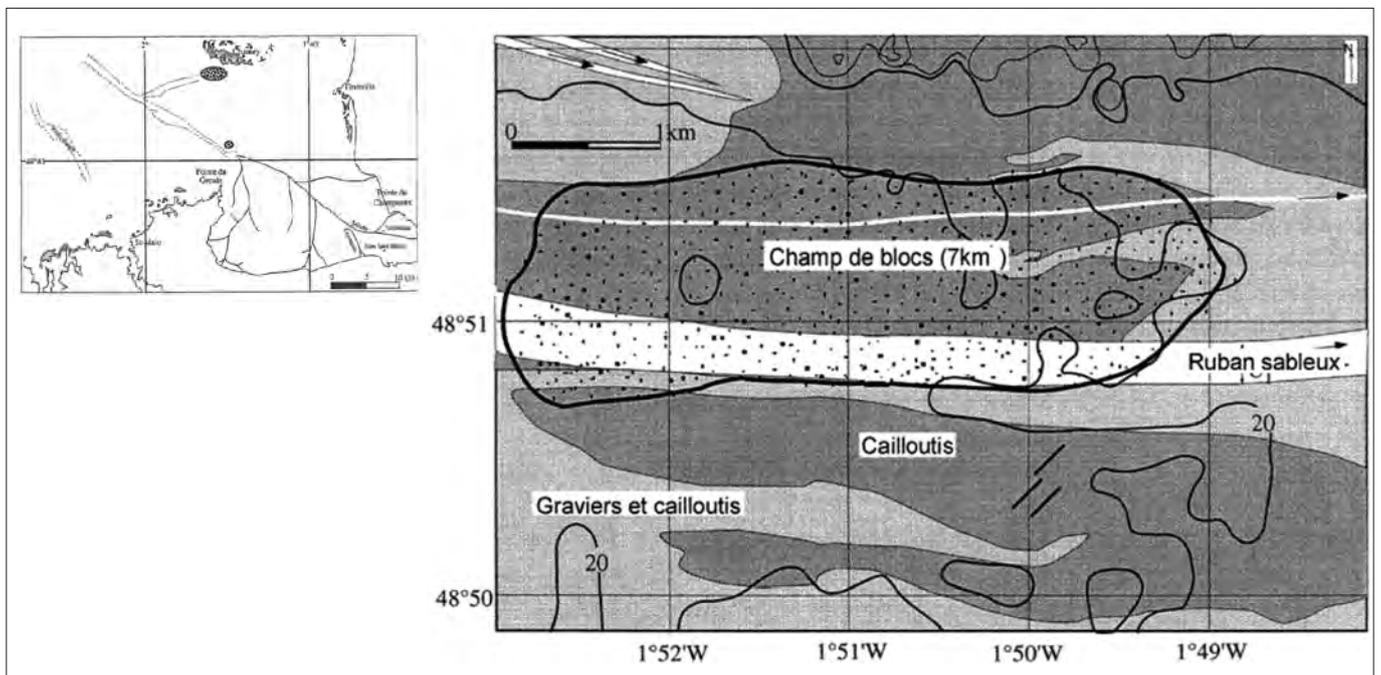


Figure 2 : Localisation des champs de blocs exotiques observés en Baie du Mont-Saint-Michel, et relation entre les sédiments actuels sableux et la sédimentation grossière relique (Ehrhold, 1999)

L'étude d'un environnement donné verra le plus souvent l'interaction de plusieurs processus sédimentaires créant différents types de structures. Dans la mer d'Okhotsk, Wong et al (2003) décrivent ainsi un milieu où sont inscrits dans les sédiments l'impact de séismes et où se mêlent des dépôts glaciaires, fluviaux et pélagiques, remobilisés en contourites (sédiments et structures sédimentaires mises en place par les courants des grands fonds) ou déstructurés par des glissements en masse sur les pentes. Cet environnement présente également, des zones sourdes, des volcans de boue et des événements de gaz liés à la présence de gaz hydrates dans les couches sédimentaires sous-jacentes. La démarche cartographique consistait jusqu'alors à représenter la variation de la taille des grains. Le maintien d'une telle approche n'est pas efficace dans un tel environnement et celle-ci se trouve insuffisante pour répondre aux différents besoins énoncés au chapitre 2.2.

La démarche naturaliste consistant à prendre des données pour réaliser des cartes correspond à la même démarche que celle du physicien prenant des données terrain pour caler les processus physiques modélisés. Le sédimentologue, à partir de données très variées et d'un apprentissage obtenu par sa formation et ses expériences antérieures, réalise un modèle des sédiments du fond marin. Les points de calage étaient par le passé les prélèvements, avec l'apport de l'imagerie, de la sismique et des systèmes de classification supervisée, la part d'interprétation est désormais réduite et la qualité de ces modèles améliorée.

4.1. La classification des sédiments : des mélanges complexes ramenés à quelques classes.

La classification des fonds est un problème ancien, Thoulet (1907) remarque ainsi : « En résumé, rien de moins précis que la classification ordinaire des fonds ; elle ne satisfait ni le savant ni le marin. ». Cette phrase vient pourtant après une description des classes sédimentaires très semblable à celles encore utilisées près d'un siècle plus tard. Pour cet auteur, « une classification des fonds marins doit répondre aux conditions suivantes :

- a) Se baser sur des caractères tellement précis, indiscutables et si nettement limités, que plusieurs opérateurs examinant le même échantillon soient assurés de toujours lui donner le même nom.
- b) Ne présenter aucun caractère vague, ou dont les limites soient susceptibles de dépendre d'une appréciation personnelle ; ne s'appliquer à aucune localité spéciale, et être complètement indépendante du gisement particulier de l'échantillon ; ne s'appuyer sur aucun caractère biologique, comme la présence de tel ou tel animal ou débris d'animal, ce qui ramènerait à la dépendance de conditions géographiques. Pour répondre à ces conditions, une classification ne peut être que mécanique et minéralogique. »

Il est étonnant que ces préceptes soient, un siècle plus tard, toujours aussi pertinents. Leur simple application suffirait pour n'avoir qu'une seule classification quels que soient la zone d'étude et les moyens mis en œuvre pour l'explorer. Les deux conditions ne sont, par exemple, pas respectées avec les méthodes acoustiques. Si la sédimentologie était une science exacte, il serait possible de rattacher toute donnée à une classification de référence ; plus on observe les méthodes et usages appliqués de par le monde et plus on voit la distance qu'il reste à parcourir pour que des références communes soient atteintes.

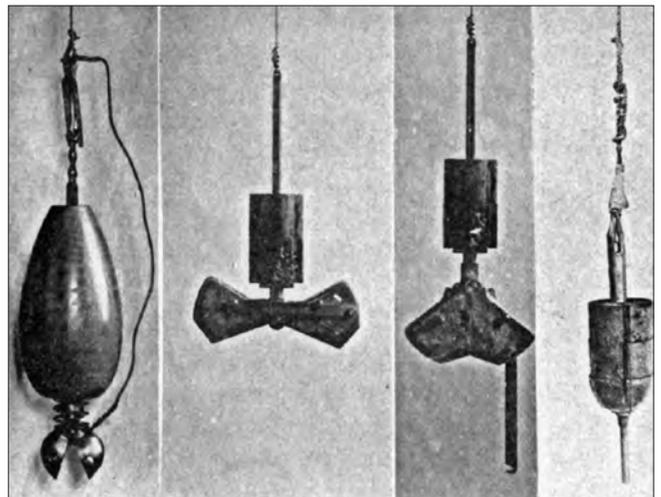


Figure 3 : Différentes méthodes de prélèvement utilisées à la fin du XIX^e siècle (Thoulet, 1907)

Définir un sédiment comme un sable ne constitue qu'une première indication, car ses composants et propriétés peuvent être hautement variables. Si il est composé de grains de quartz, de micas, de débris de coquilles ou de spicules d'oursins, il a nécessairement des propriétés différentes selon le ou les domaines d'application considérés. Les diverses particules sableuses n'ont en effet pas toutes les mêmes propriétés de remise en suspension, ni les mêmes propriétés acoustiques. De plus, un sable peut être homogène, comme les dépôts éoliens de milieu désertique, ou très hétérogène comme c'est souvent le cas en domaine marin.

Les vases sont encore plus complexes à définir car l'analyse visuelle ne suffit pas pour les différencier ; elles comportent, en proportion variable, des argiles (<2 μm), des silts (63 à 2 μm), voire des particules grossières (sableuses, graveleuses, coquillères, ou des particules carbonées). Les sédiments fins possèdent des propriétés acoustiques et géotechniques particulières qui sont très variables selon les phases impliquées. Les argiles ont en particulier la propriété d'échanger des ions, induisant des mécanismes d'absorption de la matière organique et des contaminants, et la capacité de former des agrégats organo-minéraux. Ces éléments doivent nécessairement influencer certains phénomènes comme la thixotropie, la cohésion ou la propagation acoustique.

Des blocs plurimétriques aux argiles micrométriques, il existe une suite continue de particules de toutes dimensions et formes et tous les mélanges semblent possibles. Du fait de cette continuité, les limites des classes de particules sédimentaires revêtent un caractère arbitraire. Les limites granulométriques définies par Wentworth au début du 20^e siècle à partir d'une progression logarithmique ($-\log_2$) ont très vite été en concurrence avec des classifications basées sur les changements de comportement dus aux propriétés physiques des sédiments telles que la cohésion des particules, le pouvoir absorbant, l'indice de plasticité ou le mode de transport par les courants.

La figure 4 présente de manière non exhaustive la variabilité des classifications des particules sédimentaires, sans marquer de réelle tendance temporelle. Avec 24 classes, la classification de 1984 due à Sleath, demeure la plus détaillée mais est peu utilisée. Hormis la limite supérieure des sables à 2 mm, qui paraît la seule valeur généralisée, on observe de grandes divergences de terminologie et de granulométrie. Par exemple la limite inférieure des sables peut varier de 0,05 à 0,2 mm.

Ces différences peuvent être accentuées en fonction de la méthode choisie pour mesurer la taille des particules. Ainsi Hommeril (1964) signale que, lors de tamisages à l'aide de tamis à mailles carrées, il est nécessaire de multiplier la dimension des mailles par 1,3 pour obtenir la dimension réelle des grains, afin de prendre en compte les particules allongées pouvant passer en diagonale. Les limites de 0,5 mm et 0,625 mm correspondent en fait à la prise en compte ou non de ce phénomène. En microgranulométrie laser cette erreur persiste, puisque le modèle de calcul du spectre granulaire obtenu par ces systèmes, part du postulat que toutes les particules sont sphériques.

Comme le soulignent Guyon et Troadec (1994), la caracté-

sation géométrique d'un grain, si elle nécessite parfois des outils très élaborés, n'est pas bien compliquée dans ses principes. Effectuée sur un échantillonnage de population, elle fournit un poids, une taille et un diamètre. Le problème est plus compliqué pour une particule non sphérique ; en effet, si une seule dimension permet souvent de caractériser un grain de sable roulé, deux ou trois paramètres seront utiles pour des grains en forme d'aiguille ou de plaquette; et il en faudra plus encore pour un grain de forme quelconque tel qu'un débris de coquille. Ainsi pour pouvoir rendre efficient les modèles en hydrodynamique et en acoustique il est nécessaire de remplacer la population de sphères indéformables de diamètre unique, jusqu'alors représentée par le grain moyen, par une série de paramètres permettant de représenter l'hétérogénéité de la taille et de la forme des grains. Mais l'introduction de nouveaux paramètres exige de mettre en place de nouveaux instruments de caractérisation, de nouveaux diagnostics, et de stocker de nouvelles données. Le spectre des paramètres descriptifs des sédiments est très large, pour obtenir le modèle sédimentaire idéal il sera nécessaire de décrire le sédiment par un nombre réduit de données pour s'approcher le plus possible de la réalité en laissant de côté les caractéristiques jugées secondaires.

	1922	1941	1964	1967	1971	1977	1979	1983
256	Boulder		Blocs			Blocs	Roche	
200	Cobble		Cailloux et galets	Cailloutis	Cailloutis	Galets	C Galets	Cailloux
64		Cailloux ou Ballast						
20				C Gravieres		Cailloux	Cailloux et Galets	
10	Pebble		Granules et Gravillons	M Gravieres	Gravieres			Gravieres
5								
4				F Gravieres				
2	Granule					Granules	Gravieres	
1	VC Sand			C Sables	C et M Sables	VC Sables	VC Sables	
0,5	C Sand	Sables	Sables	Msables		C Sables	C Sables	
0,25	M Sand			F Sables		M Sables	M Sables	Sables
0,2	F Sand					F Sables	F Sables	
0,125				Sablons	F Sables			
0,1	VF Sand		Sablons			TF Sables	TF Sables	
0,08				F Sables				
0,0625		Poudres						
0,05								
0,02	Silt		Limons			Silts	Limons	Fractions Fine
0,004								
0,002				Vases	Pélites			
0,001	Clay		Colloïdes			Argiles	Argiles	
0,0002		Précolloïdes				Colloïdes		

Figure 4 : Evolution au cours du temps des classifications des éléments primaires des sédiments (VC : Très grossier, C : Grossier, M : Moyen, F : Fin). 1922 : Wentworth ; 1941 : Bourcart; 1964 : Cailleux et Tricart ; 1967 : Hommeril; 1971 : Larsonneur ; 1977 : Pelletier; 1979 : Organisation Hydrographique Internationale ; 1983 : Auffret G.A.

La classification de Wentworth est la plus citée dans la littérature, mais elle n'est pas la plus utilisée en cartographie. Cette classification, idéale dans le cas de sédiments homogènes, devient difficilement utilisable lorsque le sédiment est constitué de particules de taille variable, c'est-à-dire la quasi-totalité des sédiments marins. Ainsi, un sédiment marin pris au hasard aux abords de Brest contient presque toujours de 5 à 9 phases de la classification de Wentworth; il n'est pourtant pas possible de donner à ces sédiments des noms composés de toutes ces phases.

4.2. Les différentes classifications des sédiments en cartographie sédimentaire.

La qualité des cartes sédimentaires réalisées à partir de prélèvements dépend avant tout de l'échantillonnage. Ce dernier varie selon les quatre facteurs suivants : l'intervalle entre prélèvements, le matériel utilisé (carottiers, bennes, ...) ainsi que sa mise en oeuvre, la méthode d'analyse (microgranulométrie laser, tamisage,...), et la classification adoptée. Tous ces facteurs varient selon le temps dédié à l'échantillonnage de sédiments, selon le matériel disponible et selon les objectifs de l'étude. Le pas d'échantillonnage peut ainsi varier, d'une carte à l'autre, d'un facteur 100. La facture et la résolution des cartes réalisées à partir d'une campagne unique peuvent de ce fait être très variables.

Il existe donc une distorsion entre ce qui serait nécessaire et ce qu'il est possible de réaliser. Une différence est également perceptible selon les différents laboratoires et pays. Depuis l'apparition des systèmes de télédétection acoustique, les prélèvements paraissent en première approche moins nécessaires, mais ils demeurent en fait primordiaux et doivent, pour une zone donnée, être réalisés en plusieurs exemplaires sur chaque structure sédimentaire, et sur chaque zone homogène circonscrite par chacun des systèmes acoustiques.

L'on distingue cinq types de classifications des sédiments marins : descriptive, diagramme triangulaire, tableaux à double entrée, adaptée au système d'acquisition, spécifique aux disciplines. Auquel il faut ajouter les classifications spécifiques aux grands fonds et une méthode regroupant plusieurs représentations d'un même secteur que nous appellerons la classification multiple.

4.2.1. Les classifications descriptives

La carte des natures de fond des abords de la Rade de Brest (cf. Figure 5), première carte sédimentologique publiée, fut réalisée par le Service Hydrographique de la Marine en 1897. Elle était basée sur la synthèse des descriptions de sédiments prélevés à l'aide d'un plomb suiffé, de dragages et des éléments d'une précédente carte réalisée en 1867 par le Capitaine de Frégate de Roujoux. Il était proposé d'utiliser cette carte pour effectuer du recalage sédimentologique, c'est-à-dire pour pouvoir se localiser géographiquement à partir de la connaissance des sédiments en naviguant à la sonde. Cette carte était en particulier destinée « aux bâtiments naviguant par temps de brume ou de nuit avec les feux éteints ». Un avertissement, figurant sur cette carte, signale « C'est surtout au passage de la zone du sable roux à celle du sable vert qu'on pourra déterminer sa position avec le plus de précision parce que les courbes de niveau

sont presque normales à la ligne de séparation de ces deux zones ; il sera donc indispensable de multiplier les sondes dans ces parages pour fixer nettement le changement de coloration du sable. »



Figure 5 : Extrait de la carte Iroise et entrée de Brest : nature des fonds. Service Hydrographique, 1897.

Partant de ces travaux, Thoulet (1912) fit la compilation des informations contenues par les minutes de sondes du Service Hydrographique et de ses propres prélèvements. Cette série de cartes fut publiée à des échelles proches de 1/120 000, elle demeure la seule à couvrir la totalité du littoral français, de la frontière belge à la frontière italienne. Ces cartes bathy-morphologiques sous-marines, publiées en 1912, reposent sur une classification normée, très complète : roche, sable (moins de 5 % de vase), sable vaseux (de 5 à 25 % de vase), vase très sableuse (de 25 à 50 % de vase), vase sableuse (de 50 à 90 % de vase), vase calcaire (> 90 % de vase), galets, pierres, graviers, sable sur roche, vase sur roche, coquilles vivantes ou entières, coquilles brisées, coquilles "moulues", herbiers, madrépores et maërl. Cela représente seize classes de sédiments en plus de la roche. Peu de changements majeurs ont été réalisés depuis cette classification qui a été utilisée sous diverses variantes plus ou moins complètes ou adaptées aux particularités locales. On retrouve ainsi la classification de Thoulet dans la carte du Japon "Bottom Sediment Chart in the adjacent seas of Kamaisi" publiée par le Maritime Safety Agency en 1953, avec pour seul ajout une classe de sables grossiers.

Ces classifications descriptives demeurent les plus usitées sur les cartes publiées actuellement, notamment celles destinées à un large public. C'est le cas par exemple de la série des "Bathymetric Fishing Maps" des côtes des Etats-Unis publiées par la NOAA dans les années 1980. Certaines classifications descriptives sont volontairement simplifiées afin d'être utilisées par des non spécialistes ou parce qu'elles sont pour des cartes à de petites échelles. C'est par exemple le cas de la *Fischereikarte die Ostsee und angrenzende gewässer*, publiée par le Service Hydrographique Allemand en 1952, qui cumule ces deux raisons puisqu'il s'agit d'une carte pour la pêche à 1/900 000. Elle fait suite à la classification simple utilisée dans les atlas militaires allemands de la seconde guerre mondiale (Figure 6) : sables, graviers, vases sableuses, vases, roches. Ces atlas contenaient de plus une transcription des cartes de nature de fond en propriétés géotechniques: fonds très durs, durs, mous,... destinées aux opérations de guerre des mines.

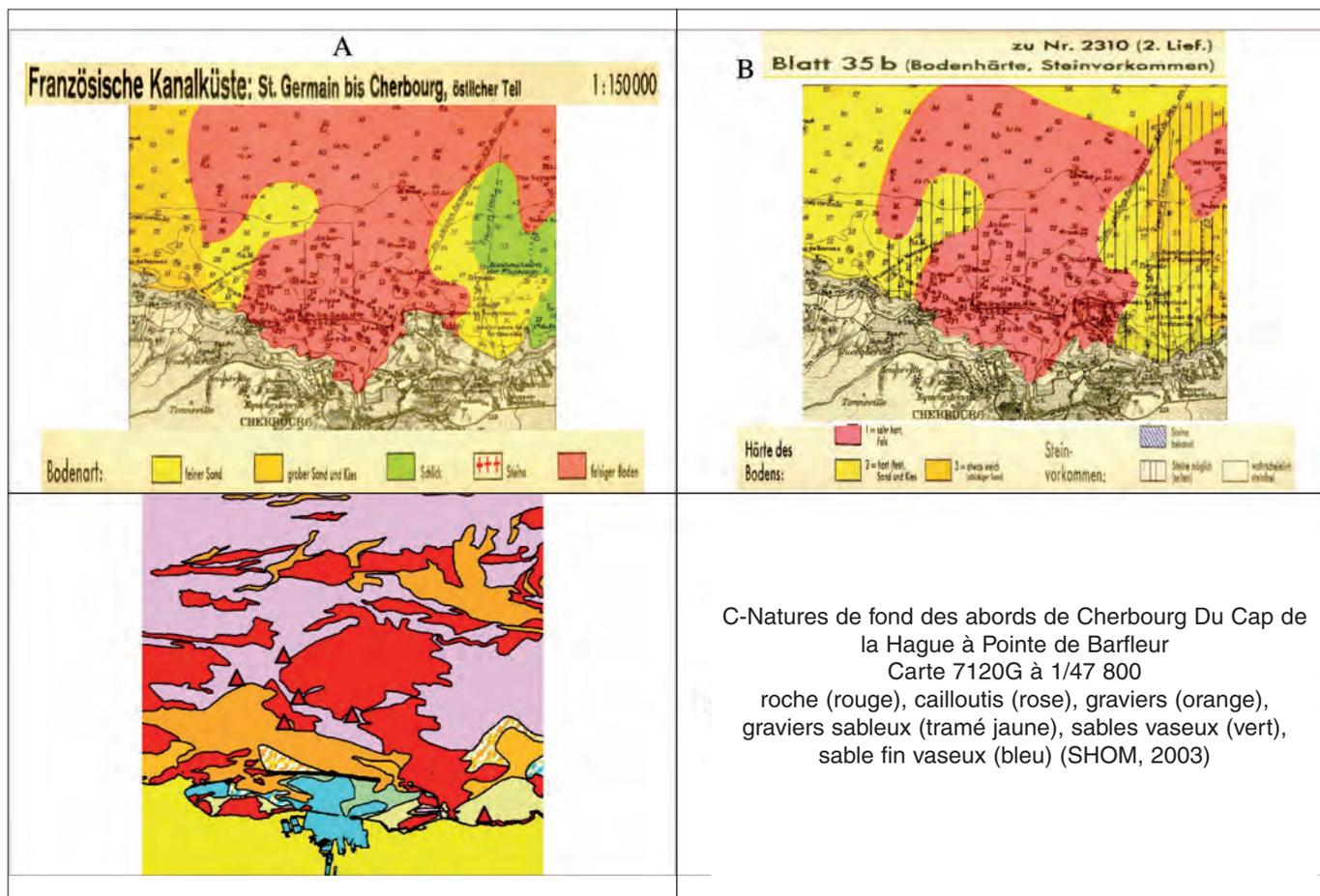


Figure 6 : Cartographie des fonds et de leurs propriétés selon les atlas militaires allemands de la seconde guerre mondiale (Oberkommando der Kriegsmarine, 1934).selon (A) la granularité des sédiments et (B) leur propriétés géotechniques ; comparaison avec (C) la carte de natures de fond (7120G) du même secteur également basée sur une classification descriptive.

De 1912 à aujourd'hui, les exemples de collections de cartes utilisant ce genre de classification sont nombreux et il serait fastidieux de les énumérer. L'apport des techniques modernes a parfois poussé les sédimentologues à compléter les classifications descriptives par l'ajout des structures sédimentaires. C'est le cas des cartes de Beigbeder (1964) et de la série des cartes physiographiques publiées par l'Institut Espagnol d'Océanographie, telle que celle de Diaz del Rio et al. (1993), qui en plus de cinq classes basées sur la granularité comporte trente-six figurés de structures sédimentaires (*fluvial lobe deposits, infralittoral rocky surface, dunes, oolitic dunes, ...*). Avec un système de classification similaire, la carte des peuplements benthiques de la Baie de Saint-Brieuc (Thouzeau et al, 1992), ou la série des cartes biomorphosédimentaires de la zone intertidale de la côte ouest du Cotentin de Guillaumont et al (1982) comportent huit classes de sables et 25 figurés de structures sédimentaires. Pour les cartes couvrant de plus vastes secteurs telle que la carte à 1/200 000 de *la plataforma continental de Galicia y las rias Bajas* de Rey Salgado publiée en 1993, la classification est plus réduite encore avec seulement trois classes (gravier, sables, vases) permettant de figurer en complément l'épaisseur des couches sédimentaires et les limites paléogéographiques.

Ce type de classification permet d'établir des classes dues à la particularité de l'environnement, c'est le cas de la carte russe à 1/500 000 de Baltique occidentale : *Bottom sediments of the western Baltic* (Emilianov E. et al, 1994) qui, parmi les 12 classes sédimentaires utilisées comprend les sables graveleux marins, les sables et silts lacustres, les argiles et silts glaciaires, les tillites, les varves. L'âge et le mode de dépôt du sédiment ont, pour ces auteurs, autant d'importance dans la classification que la granularité. Il s'avère que cette approche est pertinente pour la modélisation géoacoustique des fonds marins. La carte en question se distingue en outre par le fait qu'elle est composée d'une seconde carte représentant la nature des sédiments à un mètre de profondeur.

Les cartes marines, sans être des cartes sédimentaires, comportent plusieurs dizaines à quelques centaines de mentions de natures de fond. Celles-ci sont actualisées régulièrement par les services hydrographiques qui réalisent des prélèvements lors des levés hydrographiques afin de valider ou d'actualiser les données anciennes.

La représentation de la nature des fonds sur les cartes marines, définie par une norme de l'Organisation Hydrographique Internationale (OHI), comprend des codes attribués à chaque constituant du fond marin en couvrant les

ETAPES	CAS FRACTION >65% et V <5%	CODE
1	C >65%	C
	G >65%	G
	S >65%	S
	SF >65%	SF
2	CAS DES VASES V >5%	
	C+G >S+SF et 20 <V <50% et C >G >15%	CV
	C+G >S+SF et 20 <V <50% et G >C >15%	GV
	S+SF >C+G et 5 <V <20% et S >SF	SV
	S+SF >C+G et 5 <V <20% et S <SF	SFV
	S+SF >C+G et 20 <V <50% et S >SF	VS
	S+SF >C+G et 20 <V <50% et S <SF	VSF
	V >50% et Silts > Argiles	Vsi
	V >50% et Silts < Argiles	Var

Figure 7 : Classification de base pour toutes les études et cartes sédimentologiques réalisées au SHOM.
C : cailloutis, G : graviers, S : sables, SF, sables fins, V : vases (Ehrhold et Garlan, in Garlan 2004)

	50% < CAS FRACTION <65%	CODE
3	50 < C <65% et S+SF <35% et G <15% et V <5%	C
	50 < C <65% et S+SF <35% et G >15% et V <5%	CG
	50 < C <65% et S+SF >35% et V <5%	CS
	50 < G <65% et S+SF <35% et C >15% et V <5%	GC
	50 < G <65% et S+SF <35% et C <15% et V <5%	G
	50 < G <65% et S+SF >35% et V <5%	GS
	50 < S <65% et C+G >35% et V <5%	SC ou SG
	50 < S <65% et C+G <35% et V <5%	S
	50 < SF <65% et C+G <35% et V <5%	SF
	50 < SF <65% et C+G >35% et V <5%	SFC ou SFG
	V >50% et Silts > Argiles	Vsi
	V >50% et Silts < Argiles	Var
4	CAS AUCUNE FRACTION DOMINANTE ET V <5%	
	C+G >S+SF et C >30% et 15 <G <50 et C >G	CG
	C+G >S+SF et 15 <C <30% et 15 <G <50 et C <G	GC
	C+G >S+SF et 30 <C <50% et G <15%	CS
	C <15% et 30 <G <50% et V <20%	GS
	C+G <S+SF et C <15% et 15 <G <30%	SG
	C+G <S+SF et C <15% et G <15% et S >SF	S
C+G <S+SF et C <15% et G <15% et S <SF	SF	

aspects suivants : granularité, débris d'organismes, algues, figures sédimentaires et roches. Cette codification, valable pour les cartes marines du monde entier, permet de créer toutes les combinaisons possibles engendrant plusieurs centaines de descriptifs de fonds marins ; on ne peut ainsi pas parler de réelle classification. Par exemple on a dénombré près de cent codes sédimentaires différents dans les 80 000 données plomb suiffé acquises sur le plateau corse, par le Service Hydrographique, de 1884 à 1891.

Dans le cadre des programmes de cartes sédimentaires mis en place au SHOM, nous avons établi une classification principale (cf. Figure 7) permettant de prendre en compte toutes les combinaisons sédimentaires recensées. Cette classification atteint un niveau de précision ne pouvant être atteint que par l'analyse granulométrique de sédiments prélevés. Selon l'application à laquelle est destinée la carte et son échelle, nous adoptons une classification par simplification.

La classification des cartes G a, quant à elle, été limitée à un nombre de faciès restreints permettant de répondre aux

besoins exprimés par les pêcheurs et aux limitations imposées par le mode de représentation cartographique (Garlan, 1993). Cette classification comporte dix faciès: la roche, cinq sédiments de premier ordre (cailloutis, graviers, sables, sables fins, vases) et les mélanges (cailloutis-graviers, sables-graviers, sables-argileux, sables fins-argileux). Les cartes obtenues (cf. Figure 8 et 9) constituent la synthèse des données existantes depuis les données anciennes prélevées au plomb suiffé jusqu'aux méthodes de détection acoustique les plus récentes. Ces cartes G reposent sur des analyses granulométriques de plusieurs milliers de prélèvements, plusieurs dizaines de milliers de descriptions visuelles issues du plomb suiffé ou de descriptions de plongeurs, des données d'imagerie sonar latéral et d'imagerie SMF, des données du système de classification des fonds RoxAnn, des photographies aériennes pour les plages et l'estran et un modèle numérique de terrain. La classification utilisée ne peut pas être liée aux systèmes d'acquisition, elle doit au contraire permettre la fusion de toutes les données afin de fournir un produit adapté aux besoins des utilisateurs, s'efforçant d'offrir la meilleure précision avec la plus grande facilité d'utilisation.

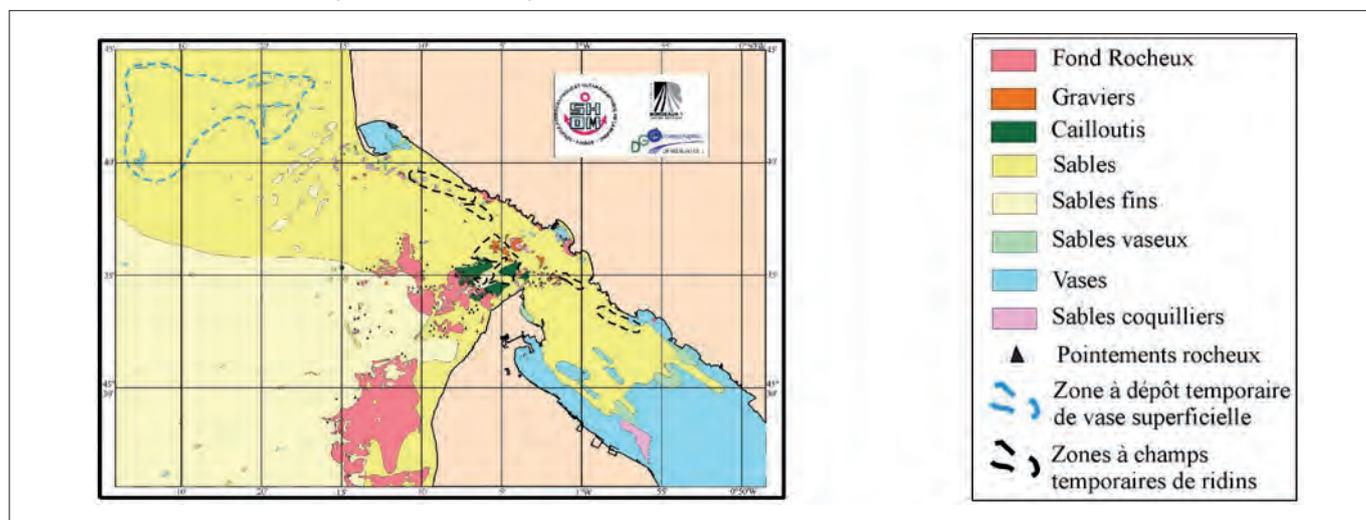


Figure 8 : Fond sédimentaire de la carte de natures de fond de l'embouchure de la Gironde, Carte 7028G à 1/45000 : SHOM Ed. (Mallet, 1998)

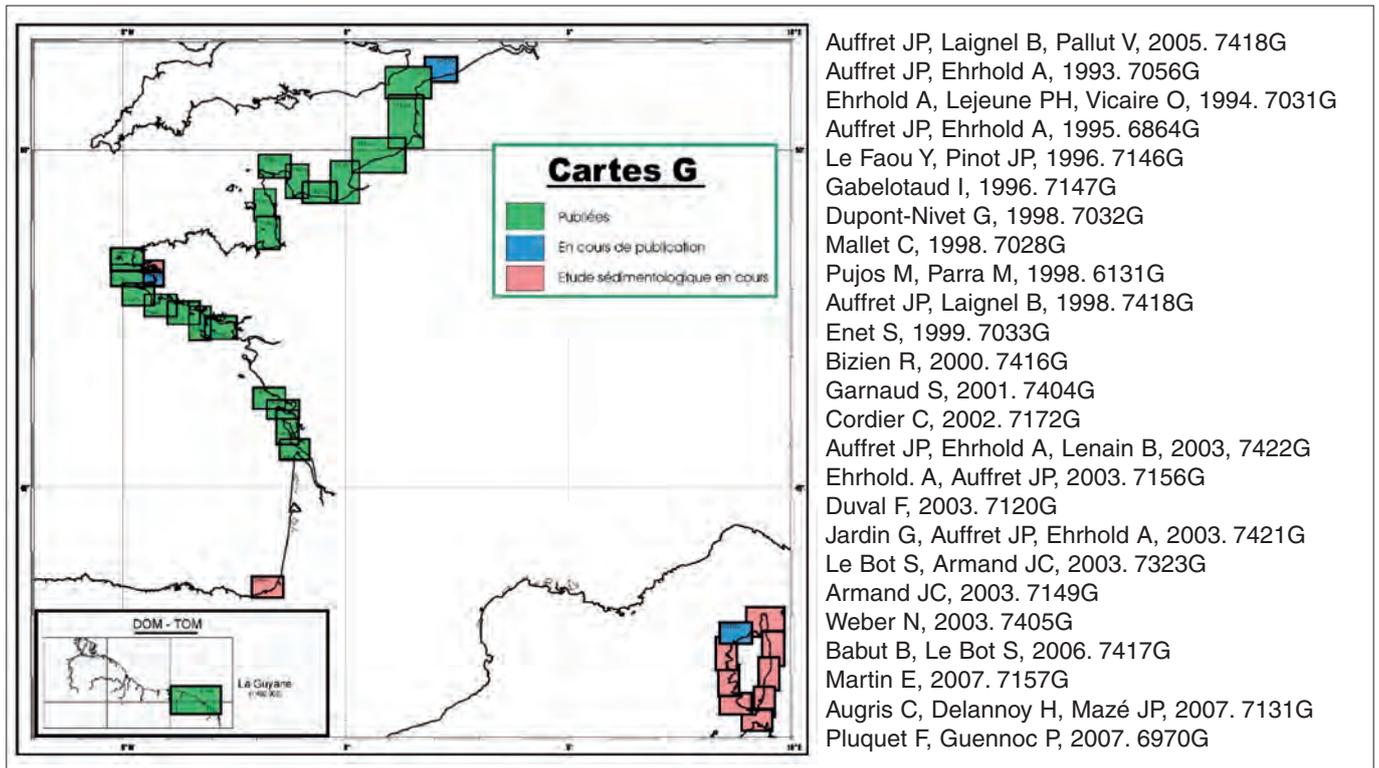


Figure 9 : Couverture géographique du programme des cartes G : 25 Cartes réalisées de 1992 à 2007, par 33 sédimentologues de différentes universités du pourtour des côtes de France et publiées par le SHOM.

4.2.2. La classification par diagrammes triangulaires

L'usage des diagrammes "*gravel-sand-mud*" et "*sand-silt-clay*", permet de prendre en compte et de bien mettre en évidence les mélanges sédimentaires, mais que les sables soient grossiers, fins ou très fins, ils se trouveront tous regroupés sous le terme sable. Une classe définie ainsi peut ainsi correspondre à 10 classes dans une autre classification.

Les cartes sédimentologiques sous-marines des côtes de France à 1/100 000, publiées dans les années 1960 à 1980 par plusieurs Universités, le BRGM, l'IRD, l'IGN et le CNEXO, étaient basées sur la synthèse des analyses de prélèvements, essentiellement effectués par dragage. Destinées aux géographes et géologues, elles reposaient sur une classification analytique créée à cette occasion, séparant les cailloutis, les lutites, les carbonates; les mélanges de sables et graviers étant caractérisés séparément par le biais d'un diagramme triangulaire. La classification différenciait ainsi : la roche, 4 classes de cailloutis, 5 classes de graviers et sables, 4 classes de vases. Les faciès étaient représentés par des trames pouvant se recouvrir, cette figuration offrait l'avantage de bien représenter les mélanges. Elle est ainsi la seule à permettre de cartographier un mélange de sables-graviers-cailloutis et vases, ou de figurer des sédiments tel que des « sables légèrement graveleux modérément envasés », mais en contre partie elle rend la carte difficilement lisible, et ceci d'autant plus que le carbonate de calcium, les coquilles et débris phycogènes y sont également figurés en surimpression.

Reposant également sur une classification par diagramme triangulaire, les cartes anglaises à 1/250 000 couvrent la totalité du plateau continental de Grande-Bretagne. Elles reposent en partie sur la classification de Folk qui est basée sur le regroupement des particules dans trois phases: les particules grossières (cailloutis et graviers), les sables (compris entre 2 mm et 62,5 µm) et les vases (silts et argiles), constituant les trois pôles du diagramme triangulaire de classification. Sur les quinze classes obtenues, les deux tiers contiennent le terme vase; le mélange de sables, graviers et vases donnent lieu à trois classes alors qu'à l'opposé les cailloutis, les graviers et le mélange de ces deux familles sont regroupés dans une classe unique. Les fonds de sable apparaissent rarement puisqu'il est nécessaire pour cela que la fraction sableuse excède 90 %. Cette classification est assez bien adaptée pour une cartographie de vastes secteurs (au-delà du 1/250 000), car elle facilite la généralisation nécessaire à de telles échelles. Mais les cartes ainsi réalisées paraissent trop imprécises pour les modélisations d'acoustique ou de dynamique sédimentaire.

Les cartes sédimentaires côtières à 1/200 000 de Nouvelle-Zélande, publiées de 1966 à 1993, utilisent une classification basée sur un tableau à deux entrées (cf. figure 10) prenant en compte la dimension et l'origine des sédiments. Après le nom du sédiment qui représente la fraction principale, est éventuellement ajouté un nom pour la fraction annexe lorsqu'elle dépasse 20 %.

COLOUR LEGEND															
DOMINANT PARTICLE COMPOSITION	SIZE OF PARTICLES (mm)	TERRIGENOUS		VOLCANIC		RED CLAY		AUTHIGENIC		BENTHIC CARBONATE		PLANKTONIC CARBONATE		SILICEOUS	
		Dominant fraction	Subsidiary fraction >20%	Dominant fraction	Subsidiary fraction >20%	Dominant fraction	Subsidiary fraction >20%								
Boulders	>256	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†
Cobbles and pebbles	4-256														
Granules and coarse sand	0.5-4														
Medium and fine sand	0.063-0.5														
Mud	<0.063														

† These do not appear on this chart

Figure 10 : Légende des cartes sédimentaires de Nouvelle-Zélande avant 1970

Depuis 1970, la classification des cartes néo-zélandaises peut être transcrite par le lecteur selon la classification de Folk grâce à un diagramme donné en marge. Les cartes de Nouvelle-Zélande contournent donc le problème posé par les limitations de la classification de Folk en réalisant une classification de type diagramme à deux entrées (comparable à celui des cartes russes) et en donnant la possibilité de transcrire cette donnée dans deux diagrammes triangulaires modifiés à partir de Folk. Cette transcription d'une classification à une autre n'est jamais aisée et, même si ces cartes semblent reposer sur les diagrammes de Folk, il s'avère que de nombreuses zones sédimentaires ne sont définies que par le diagramme à deux entrées. Il est à remarquer que pour la réalisation de la carte de Wellington à 1/15 000, Arron et Lewis (1993) ont utilisé, pour montrer la variabilité des sédiments grossiers de cette région, une classification descriptive (roche, graviers caillouteux, graviers et galets, sable).

Parmi les autres cartes à classification basée sur des diagrammes triangulaires citons les cartes du plateau continental norvégien et les cartes sédimentaires du plateau continental des Etats-Unis (*CONMAP series* à 1/1 000 000) avec 9 faciès basés sur un double diagramme triangulaire.

4.2.3. Classifications par tableaux à double entrée.

Dans les années 1980, Larssonneur établit, à partir des 12 000 échantillons prélevés en Manche, une classification qui sera utilisée pour les cartes, à 1/500 000, de la Manche (Figure 11) et du Golfe de Gascogne. Cette classification

repose sur un tableau à deux entrées: la granularité et le taux de carbonate de calcium. Son principal avantage est de bien mettre en évidence la partie biogène des sédiments; mais cette classification très détaillée ne permet pas de présenter les sédiments bimodaux tels que les mélanges de sables et graviers, ou de vases et particules grossières. En revanche, les sédiments grossiers (cailloutis et graviers), qui ne donnent qu'un faciès sur les cartes anglaises sont représentés sur cette carte de la Manche par 20 faciès différents.

Parmi les cartes à classification à double entrée, les cartes allemandes *Meeresbodensedimente in der westlichen Ostsee, Blatt Darss* à 1/100 000 de Tauber et Lemke (1995), tirent leur originalité de leur classification Médiane-Classement. Le tableau comporte en abscisse cinq niveaux de classement et en ordonnée sept classes de sédiments, depuis les sables graveleux jusqu'aux silts. Aux 35 classes ainsi obtenues s'ajoutent des figurés pour les argiles, les pierres éparses et la roche affleurante. Une telle classification ne peut que reposer sur un maillage fin et régulier de prélèvements. Elle présente une certaine complexité, ce qui la rend difficilement accessible pour le non spécialiste; à titre d'exemple, les sables fins et les sables, qui ne sont représentés que par un faciès dans la classification de Folk et par deux sur les cartes G du SHOM, sont dans ce cas subdivisés en vingt classes sédimentaires; en revanche ces cartes reflètent bien la complexité des sédiments marins et semblent a priori bien adaptées pour les modèles de dynamique sédimentaire ou de géoacoustique.

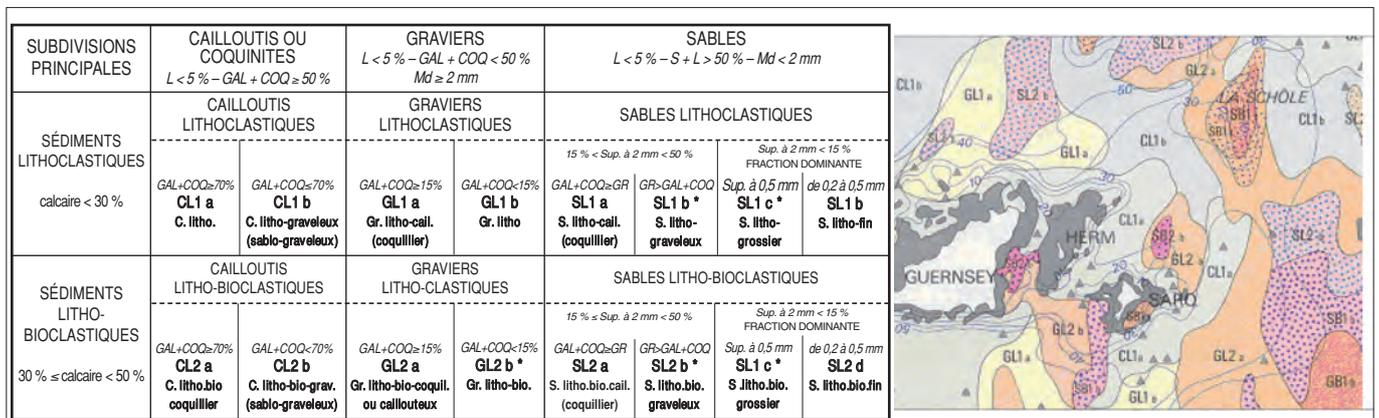


Figure 11 : Extraits de la carte des sédiments de la Manche à 1/500 000 et de sa classification (Vaslet et al, 1978)

D'autres séries de cartes utilisent les tableaux à deux entrées, comme celles déjà évoqué des cartes du Service géologique de Nouvelle Zélande. C'est le cas également de la carte colombienne à 1/25 000 de la *Dirección General Marítima Portuaria* (1983) et de la série des cartes des côtes du Portugal à 1/150 000 publiées par l'*Instituto Hidrográfico* (1985), basée sur une classification de 32 classes sans intégrer de sédiments grossiers.

4.2.4. Classifications liées au système d'acquisition.

4.2.4.1. Cartographie à partir des analyses de prélèvements

La grande majorité des cartes évoquées dans les chapitres précédents ne reposent que sur l'analyse de prélèvements. Ces cartes concernent les paramètres granulométriques mais aussi de très nombreux éléments comme la répartition des nodules, le taux de carbonate de calcium, Du fait de la quasi absence de prélèvements sur les fonds rocheux, ces derniers sont fréquemment sous estimés sur ce type de carte, c'est en particulier le cas des cartes réalisées à partir de base de données de prélèvements.

A partir des prélèvements le nom du sédiment peut être établi afin de réaliser des cartes à classification descriptive, où les proportions des différentes phases sont replacées dans des tableaux à double entrée ou triangulaires. Des tentatives de représentation des paramètres issus de l'analyse granulométrique tel que le mode ou le grain moyen ont également été faites, sans réellement se développer car elles demeurent peu compréhensibles pour l'utilisateur non spécialiste.

4.2.4.2. Imagerie acoustique : sonar latéral et sondeur multifaisceaux

L'imagerie acoustique, offerte par les sonars latéraux et les sondeurs de sédiments, constitue un réel progrès pour la cartographie des sédiments car elle permet d'observer :

- des structures sédimentaires de petite taille ou dont le relief est insuffisant pour être toujours détectés à l'aide des données bathymétriques (champs de mégarides, pockmarks,...) ;
- des éléments ayant une signature acoustique particulière tels que les bancs de crépidules, les champs d'algues ou les herbiers, ...
- la limite des affleurements rocheux parfois peu visible sur les données bathymétriques ;
- les blocs épars pluridécimétriques, les traits de chalutage, les traces d'ancres, les câbles, pipe-lines, épaves, qui ne sont détectables qu'avec ces systèmes.

Fonds absorbants (uni ou rugueux) ; fonds peu, normalement ou très réfléchissants (uni ou rugueux) ; roche affleurante ou sub-affleurante ; Champs de mégarides 2D de longueur d'onde <5 m, <10 m ; dunes ; ...

La cartographie des sédiments paraît facile à réaliser avec les images sonar latéral qui paraissent aussi explicites que des photographies du fond. Pourtant, des écarts entre ce que semblaient montrer les données d'imagerie et la vérité terrain ont été rencontrés par de nombreux auteurs. Ces écarts sont plus fréquents qu'il n'y paraît mais, pour les mettre en évidence, il est nécessaire de confronter ces images à toutes les autres données à la disposition du sédimentologue. Il est ainsi parfois observé, pour une zone homogène sur les données d'imagerie, plusieurs types de sédiments très différents. A l'opposé nous avons reconnu des limites très nettes sur des images sonar latéral qui ne correspondaient en réalité qu'à une légère variation granulométrique. Lewis et al (1998) signalent que la séparation des sables fins et des vases reportée sur leur carte a été établie à partir des prélèvements et que la délimitation des sables correspond à l'observation de mégarides. Ainsi les cartes établies à l'aide de sonars latéraux reposent le plus souvent sur une fusion des images avec des informations complémentaires telles que la bathymétrie et les prélèvements. Ceci confirme que la classification des fonds à partir des seules données d'imagerie est le plus souvent non réalisable et ne peut permettre à elle seule l'obtention de cartes sédimentaires. La réalisation de cartes à partir de données d'imagerie, demeure du reste assez peu développée au niveau mondial. La majeure partie des cartes en notre possession sont des publications françaises de l'IFREMER et du BRGM, mais nous disposons également de quelques exemples provenant des Pays-Bas, du Canada, de Nouvelle-Zélande et du Japon. Dans tous les cas, ces cartes sédimentaires obtenues ne sont pas issues du seul système de mesure et ont nécessité l'apport des prélèvements pour calibrer les observations effectuées sur les images. Il apparaît ainsi que les systèmes d'imagerie numérique sont des systèmes de caractérisation de la répartition des structures sédimentaires et des processus sédimentaires ; primordiaux pour la construction de modèles sédimentaires régionaux, mais insuffisants pour permettre à eux seuls une cartographie des sédiments.

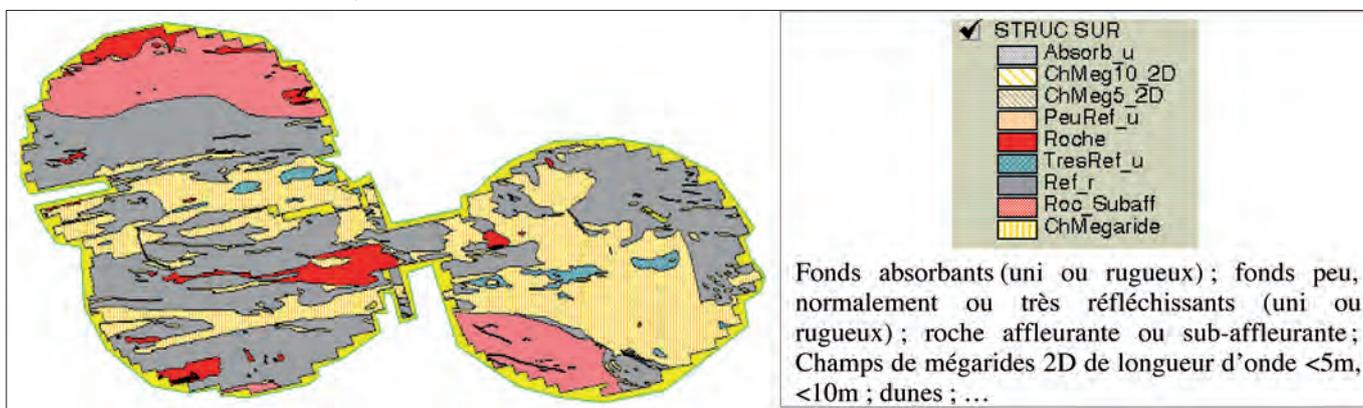


Figure 12 : Exemple de cartographie à partir d'imagerie sonar latéral extrait de la Base de Donnée Sédimentologiques du SHOM, avec une classification des fonds adaptée aux données d'imagerie.

4.3. Classifications liées aux disciplines.

Dans ce domaine existent des exemples de cartes géophysiques et géotechniques mais l'essentiel concerne le domaine de la biologie. Sans entrer dans l'analyse de toutes les cartes bio-sédimentaires, prenons trois exemples marqués par l'évolution des techniques: un atlas réalisé en 1976 basé sur des dragages ayant servi d'une part à la détermination des sédiments et d'autre part à la cartographie des espèces, une carte de 1993 basée sur le sonar latéral et la photographie aérienne, et une carte récente des habitats de Puerto Rico extraite d'un CD-Rom.

Les cartes biosédimentaires du Golfe de Gascogne de Chassé et Glémarec (1976) reposent sur la distribution des espèces animales, sur leurs affinités entre elles et vis-à-vis des sédiments, sur les climats marins et sur les caractéristiques sédimentaires écologiquement pertinentes. Ces auteurs estiment pouvoir transcrire toutes les caractéristiques granulométriques des fonds marins avec la délimitation des différents peuplements. Cette classification adaptée aux études de biologie et à la pêche différencie plus précisément les fonds présentant une forte activité biologique avec les classes suivantes : sables envasés hétérogènes, graviers vaseux hétérogènes, graviers envasés, graviers propres, sables grossiers, sables dunaires, sables fins, sables fins envasés, vases sableuses, vases.

Les cartes de l'Herbier de posidonie et des fonds marins de Paillard et al (1993) au 1/10 000 reposent sur 8 classes concernant les sédiments et les organismes ou les deux : affleurements rocheux, biocénoses infralittorales photophiles de substrat dur, herbier à *Posidonia oceanica*, blocs et galets, sédiments grossiers envasés, sable moyen à fin envasé, biocénoses de sables fins de haut niveau, biocénose des sables fins bien calibrés. On y distingue trois classes de sables fins alors que tous les autres sédiments, des sables grossiers aux blocs, sont regroupés dans deux classes mal différenciées. Cette classification a été définie en fonction du besoin (organismes plus développés dans les sédiments fins) et du mode d'acquisition (sonar latéral). L'utilisation d'une telle carte pour d'autres applications semble risquée, voir impossible.

La carte bio-sédimentaire de Puerto Rico publiée par la NOAA en 2001 est avant tout une carte de répartition des algues et des coraux, la nature des fonds n'étant représentée, que lorsqu'il y a moins de 10 % d'organismes sur le fond, par trois classes (Sable – Vase – Roche).

Toutes ces cartes mixant la biologie et la nature des fonds ne sont pas des cartes sédimentaires sensu-stricto, mais elles mettent en évidence les besoins des biologistes et, par voie de conséquence des pêcheurs, qui recherchent une classification plus précise pour les sédiments fins que pour les sédiments grossiers, à l'opposé des besoins des exploitants de granulats marins et de ceux pour la pose de câbles ou de pipe-lines. Il apparaît que les besoins de la biologie marine sont très importants et nécessitent de différencier très finement les sédiments (fins, grossiers, dunaires, envasés, ...), ce qui n'est guère possible avec des données d'imagerie acoustique et semble imparfait avec les classifications trop réductrices.

4.4. Cartes à classifications multiples.

La première approche de la classification multiple a été présentée dans la thèse d'état de Larsonneur (1971). Cet auteur a établi pour la Baie de Seine et le nord Cotentin une série de cartes montrant la répartition des différents constituants du fond marin déduits de l'analyse d'échantillons en laboratoire. Sont ainsi représentés sur différentes cartes : les éléments phycogènes, les minéraux majeurs (quartz, micas, feldspaths), les minéraux accessoires (hornblende, minéraux lourds, glauconie, épidote), les paramètres granulométriques (classement, Percentile84,...), ... La répartition des sédiments est représentée par plusieurs cartes des différentes phases granulométriques ainsi qu'une carte spécifique des sédiments reposant sur une classification à 16 classes prenant en compte la granularité et les éléments biogènes : cailloutis purs, cailloutis-graviers, sables zoogènes hétérogènes, sables à débris phycogènes, sablons, ...

Sur le même principe, le *Geological Survey of Canada* a publié une série de huit cartes "*Surficial geology of the Queen Charlotte basin*" (Barrie et al, 1990), du même secteur et représentant : les lieux d'acquisition des données, les profils d'acquisition de données sismiques et sonar latéral, la nature des fonds des sédiments superficiels en chaque point de prélèvement, la distribution surfacique des sédiments avec une classification à 12 classes, la distribution surfacique des sédiments basée sur le grain moyen, le classement des sédiments selon 4 classes, les sédiments selon leur processus de mise en place, les unités morpho-sédimentaires. L'approche, consiste dans ce cas à bien prendre en compte les diverses méthodes d'acquisition de données et à réaliser autant de cartes que de données obtenues, afin de permettre à l'utilisateur de trouver aisément l'information qu'il recherche ; en revanche la multiplicité des cartes rend leur usage malaisé.

Avec la *Marine Geology Map series* à 1/200 000, telle que la carte réalisée par Katayama et al en 2000, le Geological Survey of Japan publie depuis près de 30 ans des cartes sédimentaires comportant une carte papier de la nature des fonds, une notice ainsi que des calques superposables à la carte principale, dont le sujet varie selon les coupures. Ces cartes sont depuis 2002 publiées sous forme numérique sur CD Rom. A l'opposé des exemples précédents, ces cartes ne vont pas jusqu'à la côte, débutant le plus souvent aux isobathes 20 ou 30 mètres, mais en revanche elles ne sont pas limitées vers le large et peuvent représenter des profondeurs supérieures à 1 000 mètres. Les 22 cartes analysées couvrent environ la moitié du plateau continental japonais et montrent la grande richesse de cette collection. L'analyse suivante met bien en évidence la recherche de solutions innovantes mises en œuvre par les sédimentologues.

Pour chaque carte, la carte principale donne la nature des fonds en utilisant différentes classifications parfois complexes que l'on peut synthétiser ainsi :

- Les cartes publiées de 1976 à 1978, sont basées sur une classification triangulaire sable-silt-argile donnant, selon les coupures, de six à huit faciès silto-argileux auxquels s'ajoutent cinq classes de sédiments granulaires sablo-graveleux plus une classe spécifique pour les fonds couverts de spicules d'éponges. En ajoutant les fonds rocheux, et un ou deux figurés pour les cailloutis on aboutit à 15 différents types de fonds qui sont de plus différenciés selon cinq périodes de dépôt par l'orientation des trames, il y a donc en tout de 20 à 30 faciès différents selon les cartes.
- La carte parue en 1978, également basée sur la classification sable-silt-argile, est complétée par la proportion des différents constituants de la fraction grossière. On obtient pour cette carte: 4 figurés pour les sables très fins, 3 pour les sables fins, 2 pour les sables moyens, 2 pour les silts, 2 pour les silts argileux, et 6 faciès simples, soit 19 classes de sédiments différents.
- Les cartes publiées de 1984 à 1990, utilisent une classification originale basée sur la méthode du "*Fineness Modulus*". Il s'agit de la somme du pourcentage de chacune des classes obtenues à partir de l'histogramme de distribution granulométrique. Les auteurs de cette classification estiment que ce paramètre permet d'allier en une seule valeur le classement, la médiane et l'asymétrie ; mais ses variations semblent difficilement utilisables par un non-spécialiste et l'usage de ce paramètre ne s'est pas généralisé.
- Les cartes publiées de 1993 à 2002, sont basées sur une classification simple comprenant de cinq à neuf classes, sans mélanges, limitées par les valeurs de la médiane (2mm, 1, 0.5, 0.25, 125 µm, 63 µm, 16 µm, 4 µm) ; des figurés surimposés viennent compléter cette classification : roche, sédiments bruns oxydés, dunes sous-marines, escarpements, ...

Ces cartes sont complétées par 2 à 6 cartes annexes à la même échelle, parfois sur calque, et représentant les différents paramètres suivants :

- la granularité selon les classifications de Shepard (sand-silt-clay), de Folk (sand-mud-gravel), ou des deux à la fois ; mais aussi la médiane, le classement, le pourcentage en vase, les logs sédimentaires répartis sur la carte,...
- les constituants du sédiment avec les cartes de concentration de divers constituants : organismes benthiques ou planctoniques, débris de bois et plantes, pellets, débris de coquilles, galets de vase, fragments lithiques, verres volcaniques, grains de quartz, de biotite, ...
- les structures et épaisseurs sédimentaires détectées par photographie sous-marines, imagerie sonar latéral, et sondeur de sédiments 3.5 kHz.

- les paramètres physiques comme les courbes d'isovaleur de température des vases ou du potentiel d'oxydo-réduction, la turbidité des fonds, ...

Par exemple, la carte annexe des constituants de la fraction supérieure à 0.5 mm, de la carte *Nishi-Tsugaru basin*, exprime la variation des proportions en débris de coquilles, foraminifères, pellets, débris de plantes, quartz, quartz colorés, feldspaths, minéraux lourds, débris de roche, pierres ponces, tessons de verre et autres. Une carte annexe de la carte *d'Hachinohe*, représente la répartition de l'hypersthène, l'augite, les roches volcaniques, les roches granitiques, les arêtes de poisson, les bryozoaires... Toutes ces cartes permettent ainsi de présenter des particularités régionales utiles pour plusieurs applications, tel que l'exploitation des sédiments ou la dynamique sédimentaire. Une telle approche exige non seulement de faire des prélèvements en grand nombre mais aussi qu'ils soient tous pratiqués spécifiquement pour la carte, avec des analyses et études poussées sur chacun des échantillons récoltés.

Plutôt que d'utiliser une classification unique, le service géologique du Japon a donc adapté la représentation cartographique à la variabilité des fonds marins, mais sans doute aussi, aux méthodes d'acquisition des données et des analyses de laboratoire effectuées. Malgré les 150 à 400 prélèvements effectués pour chacune des cartes, certains secteurs ne sont délimités que par un ou deux prélèvements. Il existe ainsi un écart entre la grande précision de la classification effectuée sur des carottages et la relative imprécision due à l'espacement entre les prélèvements. Le large éventail des éléments indiqués sur ces cartes montre bien la complexité de la nature des fonds marins et la difficulté de la représenter dans sa complétude. Ces cartes demeurent exceptionnelles par leur qualité et parce qu'elles intègrent simultanément les sédiments du plateau et du talus continental, à une échelle relativement précise.

Les cartes sédimentaires du *British Geological Survey*, qui comprennent une centaine de publications depuis 1980, contiennent autour de la carte principale au 1/250 000 de 2 à 8 cartes annexes à des échelles variant du 1/500 000 à 1/4 000 000. Ces dernières représentent de très nombreuses caractéristiques du fond : les dépressions majeures, les zones rocheuses, les bancs sableux et les zones de dunes. Les dunes comprennent parfois l'indication de leur hauteur, de l'orientation des crêtes et même, comme par exemple sur la carte d'Ostende, de leur sens de déplacement. L'analyse des cartes annexes met en évidence les différents éléments non représentés sur la carte principale (Figure 13), et donc non figurés sur une carte de nature de fond classique reposant sur une classification telle que celle de Folk.

1 : Grain moyen de la fraction sableuse (59 %)	2 : Taux de CaCO3 de la fraction sableuse (90 %)
3 : Taux de CaCO3 de la fraction grossière (82 %)	4 : Taux de CaCO3 du sédiment total (57 %)
5 : Carte morpho-structurale (42 %)	6 : Carte des paléovallées (7 %)
7 : Epaisseur des sédiments holocènes et IV (48 %)	8 : Carte des directions de transit sédimentaire (3 %)
9 : Classement de la fraction sableuse (13 %)	10 : Répartition de la fraction argileuse (23 %)
11 : Epaisseur de la fraction grossière (5 %)	12 : Taux de CaCO3 de la fraction argileuse (38 %)
13 : Mode de dépôt (Erosion, Transport, ...) (3 %)	14 : Carte de répartition des sables (4 classes) (2 %)
15 : Propriétés géotechniques (4 classes) (16 %)	16 : Densité et distribution des pockmarks (1 %)

Figure 13 : Type et fréquence des cartes annexes des cartes sédimentaires à 1/250 000 du BGS.

La fréquence des cartes annexes et leur objet semblent adaptés à la complexité de la sédimentologie locale et varie considérablement ; ainsi le taux de CaCO₃ de la fraction sableuse est représenté sur 9 cartes sur 10, alors qu'il n'existe qu'une seule carte de pockmarks (cratères dus à l'évacuation du gaz contenu dans les sédiments). De manière générale plus de la moitié des cartes annexes concernent les teneurs en calcaire. Les cartes de répartition des sables et vases, des structures sédimentaires et de l'épaisseur des sédiments, constituent l'essentiel des autres sujets représentés sur les cartes annexes.

Au cours des dernières années sont apparues de nouvelles cartes multiples numériques dans le cadre de synthèses géologiques comme par exemple « De Geo-Atlas van Nederland » réalisé en 2003 par le TNO (Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen), qui représente pour la totalité du plateau continental hollandais une cartographie de la morphologie, de l'épaisseur du Pléistocène, de la nature des sédiments,...

C'est également le cas des résultats des projets européen Interreg Geosynth (Guennoc et al, 2002a) et Lima (Guennoc et al, 2002b) auxquels nous avons participé et qui ont abouti à la publication de CD Roms comportant entre autre la morphologie des fonds, la nature des fonds, la répartition des corps sédimentaires, la géologie des formations superficielles, la géologie du socle, l'épaisseur des formations quaternaires,... (cf. figure 14).

4.5.Synthèse sur les cartes sédimentaires

La cartographie du Pas de Calais réalisée dans le cadre d'une coopération franco-anglaise (Guennoc et al, 2002a), a permis d'obtenir deux cartes très différentes selon qu'elles étaient réalisées selon les classifications du SHOM ou de Folk (cf. figure 15). On observe que pour un type de fond de la classification de Folk peuvent correspondre jusqu'à 4 types de fonds de la classification du SHOM.

Dans le cadre de notre recherche des avantages et inconvénients des différentes classifications, nous avons également testé la méthode de classification de Tauber et Lemke (cf.§4.2.3) sur un secteur de la carte du Havre, qui bénéficie

FOLK	SHOM			
G	C	G	G Sm	
gS	S	Sf G	S G	
(g)S	S	Sf		
sG	G	G S	G Sf	S G
S	S	Sf	S V	
gmS	S G	S	S V	
mS	G Sm	V G		
gM	V Sf			

Figure 15 : Comparaison des résultats obtenus selon les classifications de Folk et du SHOM (C : cailloutis, G : graviers, S : sables, SF : sables fins, V : vases, g : graveleux, m : vaseux, s : sableux)

d'un échantillonnage particulièrement dense. Les 2 720 prélèvements ont été classés selon la médiane et le classement puis le tracé des zones a été effectué. De grandes différences sont apparues entre les deux cartes ; l'essentiel de l'estuaire est dans la carte G constitué de sables vaseux et de vases sableuses, alors que la carte réalisée avec la classification de Tauber et Lemke présente presque exclusivement des sables fins. Une analyse plus approfondie des résultats donnés par cette classification, montre que l'utilisation de la médiane tend à occulter le caractère bimodal des sédiments. Cette méthode basée exclusivement sur les prélèvements est parfaitement adaptée pour une cartographie automatique par ordinateur mais ne semble pas adaptée pour la représentation de sédiments très hétérogènes et pour les régions contenant des affleurements rocheux.

Comme le signale Fütterer (2000), il ne semble pas exister de classification combinant toutes les caractéristiques pertinentes d'un sédiment. Il apparaît en effet que la diversité des classifications des sédiments marins est grande, que différents essais ont été menés dans de nombreux pays pour rechercher la classification idéale et qu'une carte est insuffisante pour représenter à elle seule la complexité des fonds.

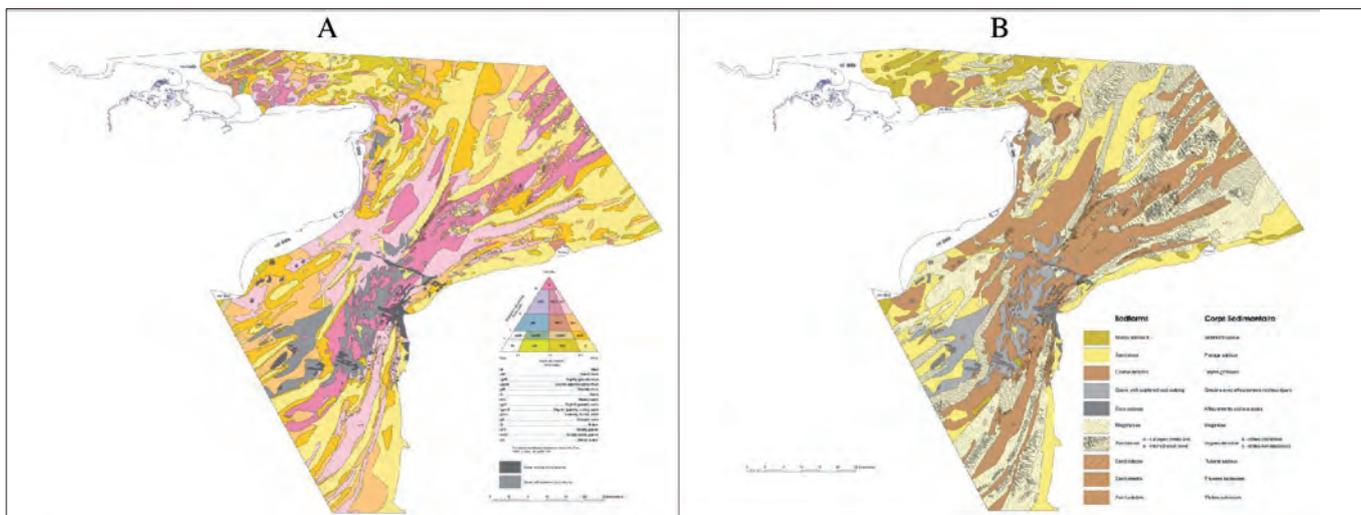


Figure 14 : Nature des fonds (A) et corps sédimentaires (B) du Déroit du Pas de Calais et de ses environs (Guennoc et al, 2002a).

Une carte dite sédimentaire peut représenter des informations très variées : dimension des particules, composants chimiques, processus physiques, géomorphologie, géologie. Ces cartes ont des échelles variant de 1/5 000 à 1/30 000 000 et reposent sur des données très diverses en nature, qualité et quantité. Une carte sédimentaire avait pour rôle, jusqu'à il y a quelques années, de montrer les constituants du fond marin aux utilisateurs, mais aussi d'enregistrer l'état des connaissances à l'instant de la publication. Désormais, avec la présence des bases de données, les cartes ont uniquement pour objet de répondre aux besoins des utilisateurs, praticiens et scientifiques.

Nous avons vu qu'il existe différentes classifications permettant d'intégrer des données très variées appelées à fournir des produits adaptés à chacun des différents besoins présentés précédemment. Le constat global montre l'absence de convergence vers une classification de référence. Nous observons, au contraire, des écarts de plus en plus grands entre deux extrêmes :

- les cartes basées exclusivement sur la granularité déduite de prélèvements ponctuels : diagrammes à deux ou trois entrées offrant une classification la plus précise possible des sédiments, mais délimitant mal l'extension de ces sédiments ;
- les cartes physiographiques reposant sur l'imagerie acoustique et la morphologie mettant bien en évidence les structures et les limites principales, mais caractérisant mal la nature des fonds.

Entre ces deux extrêmes, les cartes à classification descriptive, basées sur de multiples sources d'information, des prélèvements et un Modèle Numérique de Terrain (MNT), sont détachées du moyen d'acquisition. Elles sont parfois complétées par des cartes annexes et deviennent alors adaptées aux divers besoins.

L'analyse des diverses classifications utilisées sur les cartes sédimentaires amène deux constats :

- les cartes représentant la granularité ne sont qu'un des éléments permettant de représenter les fonds marins une carte unique ne peut en fait à elle seule représenter la complexité du fond, un prochain article montrera comment les produits numériques permettent de réaliser et visualiser une cartographie multicouches,
- la granularité nécessite une normalisation. Si une carte sédimentaire peut présenter les sables soit dans une classe unique, soit dans une dizaine de classes, cela veut dire que sous un même nom sont représentés des sédiments différents. La classification des particules élémentaires ne pose en fait pas de problème et devrait être proche de celle de Wentworth (cf. figure 4), la question se pose pour les mélanges. Quel pourcentage de graviers pour que des sables soient appelés sables graveleux ? Combien de types de sédiments ? Comment adapter les classifications aux échelles ? ...

Il apparaît que le grand nombre de classifications décrites précédemment n'est pas exhaustif et de nouvelles classifications continueront à être créées pour s'adapter aux différents besoins et bénéficier de l'évolution des sciences et des techniques. La complexité des fonds paraît incompatible avec une norme universelle adaptée à toutes les études et toutes les échelles.

5. CONCLUSION

Les classifications par diagrammes triangulaires et tableaux à deux entrées ont pour principal intérêt de permettre la réalisation d'une cartographie par calcul non supervisé de paramètres directement extraits des bases de données. Le tracé automatique des limites de zones homogènes par traitement géostatistique est alors en théorie possible. Pour avoir une qualité satisfaisante, ces cartes doivent reposer sur un maillage de prélèvements très dense, afin d'appréhender toute la variabilité des fonds. En l'absence d'un tel maillage, c'est-à-dire lorsque l'écart entre les prélèvements est supérieur à l'échelle de représentation, le tracé automatique n'est pas satisfaisant car il fait abstraction de tous les éléments pris en compte par l'expert lorsqu'il réalise une carte des sédiments: la morphologie, la présence d'affleurements rocheux et de structures sédimentaires, l'existence de processus sédimentaires particuliers, ...

Les cartes doivent par essence être non ambiguës, explicites et reposant sur un code normalisé. La normalisation pour la cartographie des sédiments devrait avant tout consister à définir et classer les différents produits possibles (cartes de nature de fond, d'épaisseur de sédiments, de structures sédimentaires, ...). Pour disposer de tels produits analogiques et numériques de qualité, évoluant au fur et à mesure des progrès de la connaissance et des techniques, il est nécessaire de disposer de classifications adaptées aux données :

- les classifications des échantillons prélevés et analysés en laboratoire sont les plus nombreuses. Les résultats d'analyse en laboratoire étant désormais en base de données, le calcul de dizaines de paramètres granulométriques, ou de noms du sédiment selon de multiples classifications est possible. Les cartes basées sur de telles données ne devraient, en toute rigueur, ne donner les résultats qu'aux points de mesure sous forme d'histogrammes, diagrammes, ..., comme ont pu le faire Larsonneur (1971), les sédimentologues du service géologique japonais, Brooks et al (2003),...
- les descriptions de sédiments par analyse visuelle d'échantillons, de photographies ou lors de plongées ne peuvent être transcrites que par une classification descriptive, mais souffre de pouvoir être affectées par la perception de l'observateur. Ces données parfois plus que centennaires, sont très nombreuses et couvrent la majeure partie des côtes mondiales ; la majorité des natures de fond des cartes marines ont cette origine.
- les données d'imagerie doivent reposer sur une classification normalisée des niveaux de réflectivité et des structures sédimentaires (épaves, roches, champs d'algues,...).
- les données de sismique sont transcrites sous forme d'épaisseur des sédiments, de strates et/ou de faciès acoustiques, permettent de voir le fond marin dans les trois dimensions ;
- à cela peuvent s'ajouter les mesures chimiques des sédiments (CaCO₃, carbone organique, ...) et des fluides interstitiels. Les cartes représentant ces éléments devraient en toute rigueur prendre en compte les éléments précédents, car en reliant des données ponctuelles, sans données d'imagerie ou paramètres granulométriques le risque d'imprécision existe, comme par exemple celui d'attribuer de fortes concentrations en carbone organique à des secteurs rocheux.

L'importance relative des paramètres caractérisant le fond varie différemment selon les applications; certains auront un rôle majeur dans la modélisation de la dynamique des dunes, d'autres dans la rétrodiffusion des ondes acoustiques, Ainsi la porosité pourra être primordiale pour certaines applications tel que la géoacoustique ou pour les modèles d'océanographie mais inutile pour de nombreux autres utilisateurs de cartes sédimentaires.

Comme nous le voyons au travers de l'analyse de toutes les cartes publiées dans le monde, la carte sédimentaire unique avec une classification universelle adaptée aux différents utilisateurs est irréalisable. Par le développement de bases de données intégrant de très grandes quantités de données très variées sur la nature des fonds, nous disposons maintenant des outils nécessaires à la réalisation de produits numériques nouveaux sur lesquels pourront être représentés les paramètres nécessaires aux différents utilisateurs. Nous décrirons dans un prochain article cette nouvelle approche de la sédimentologie et les produits qui pourront en découler.

Les cartes sédimentaires sont très variées en mode de représentation. Le problème n'est pas seulement du à l'absence de norme de classification internationalement reconnue, mais il provient également de la grande diversité des objets de la sédimentologie pouvant être représentés ; la majeure partie des cartes sédimentaires ne montrent pas l'existence des dunes alors que les systèmes modernes permettent depuis près d'une décennie de décrire parfaitement leur localisation et morphologie (Garlan, 2007). L'utilisation d'une carte principale associée à plusieurs cartes annexes (exemple des cartes du Japon et du Royaume Uni), est une démonstration de la grande diversité des éléments pouvant être représentés en sédimentologie mais aussi de l'impossibilité de représenter, en plus de la granularité, toutes les caractéristiques sédimentaires. Ceci nécessite la réalisation d'une typologie des objets constituant les fonds, leur gestion en base de donnée et la synthèse de ces informations sous forme de produits numériques 3D. La modélisation sédimentaire constitue une interface entre la réalité complexe des fonds marins et les modèles des sciences connexes tels que la dynamique sédimentaire, la biosédimentologie, la géotechnique, la géoacoustique et l'océanographie. Elle doit être affinée en permanence afin de bénéficier des progrès technologiques qui conduisent à une somme croissante de données de caractérisation du fond marin. La modélisation sédimentaire est une synthèse de ce qui était jusqu'alors diffusé sous forme de cartes.

Au début du XX^e siècle le premier sédimentologue français écrivait "Ce que je sais n'est rien par rapport à ce que j'ignore" (Thoulet, 1907). Si un siècle plus tard l'assertion reste juste, il s'avère que la plupart des questions générales posées à l'époque ont heureusement été résolues ; mais une approche à haute résolution est devenue nécessaire, et celle-ci peut être obtenue grâce aux systèmes de mesures mis à notre disposition depuis une vingtaine d'années. Les géologues ont tout d'abord cherché à connaître l'organisation globale des sédiments du domaine maritime. Les cartes sont désormais numériques, elles peuvent représenter le fond marin dans les trois dimensions, et être formulées en vue des différentes applications. L'importance du

travail qui demeure est néanmoins considérable, notamment pour la réalisation des levés, la constitution des bases de données et l'affinement de la gestion à microéchelle des interactions entre biologie, nature des fluides, sédiments et propriétés physiques.

En remontant aux travaux fondateurs de la sédimentologie, en analysant les cartes et méthodes mises en œuvre de par le monde, en étendant nos études des petits aux grands fonds, et en analysant les méthodes et besoins des sciences connexes, il apparaît que les outils existent pour réaliser un modèle sédimentaire performant, source unique à tous les utilisateurs de données du fond marin. Une évolution des méthodes demeure nécessaire afin de disposer d'une plus grande homogénéité des données, depuis les plages jusqu'aux fonds océaniques.

BIBLIOGRAPHIE

- Abbasi R., 1989. Importance de l'hydrographie dans l'exploitation des ressources. *Revue Hydrographique Internationale*, LXV1(1), 145-155.
- Barrie J.V., Luternauer J.L., Conway K.W., Sawyer B., Bedard L.J., L'Espérance G.F., 1990. Surficial geology of the Queen Charlotte basin, Moresby Island-Queen Charlotte sound. *Commission géologique du Canada Ed.*, huit cartes à 1/250 000.
- Beigbeder Y., 1964. Elaboration de cartes géomorphologiques et sédimentologiques du littoral du Golfe Normand-Breton à l'échelle de 1/10 000. C.R. 10^e C.I. *Photogrammétrie, Lisbonne, Bull. Soc. Fr. Photogram.*, 15-16, 161-166.
- Brooks G.R., Doyle L.J., Davis R.A., DeWitt N.T., Suthard B.C., 2003. Patterns and controls of surface sediment distribution: west central Florida inner shelf. *Marine geology*, 200, 307-324.
- Chassé C., Glémarec M., 1976. Atlas des fonds meubles du plateau continental du Golfe de Gascogne. *Université de Bretagne Occidentale-CNEXO : 5 cartes*.
- Diaz del Rio V., Somoza L., 1993. Mapa fisiografico del Mar Menor. *Instituto Espanol de Oceanografía, N° 14*, 1/25 000.
- Ehrhold A., 1999. Dynamique du comblement d'un bassin sédimentaire soumis à un régime mégatidal. *Mémoire de thèse, Université de Caen*.
- Emylianov E., Neumann G., Harff J., Kramarska R., Uscinowicz S., Shirshov P.P., 1994. Quaternary deposits of the western Baltic et Bottom sediments of the western Baltic. *Head Department of Navigation and Oceanography, Russian federation Ministry of Defense, Sankt Petersburg*. 1/500 000.
- Fütterer D.K., 2000. The solid phase of marine sediments. *In Marine Geochemistry, Schulz H.D. et Zabel M. Ed. Springer Verlag*, 1-22.
- Garlan T., 1993. Innovation in marine cartography at SHOM. *International Hydrographic Review*, LXX(1), 103-120.
- Garlan T., 2004. Apports de la modélisation dans l'étude de la sédimentation marine récente. Mémoire d'HDR, Université des Sciences et Techniques de Lille : 155 p.
- Garlan T., 2007. Study on marine sandwave dynamics. *International Hydrographic Review*, Vol 8, N°1: 26-37.
- Guennoc P., James J.W.C., Vinchon C., Simien F., Janjou D., Harrison M., Philpott S., Bee E., Garlan T., Trentesaux A., Le Bot S., Mahieux G., Briet D., Augris C., 2002. GEOSYNTH, Synthèse géologique du Pas de Calais. *CD-Rom, BRGM-BGS Ed.*

- Guennoc P., Pluquet F., Palvadeau E., Ehrhold A., Théron M., 2002. LIMA2 Cartographie de la plate-forme septentrionale de la Corse : Balagne et Agriates. Cartes à 1/25 000 de Nature de fond et mosaïques d'images sonar latéral. *Rapport BRGM/RP 51963 FR*.
- Guillaumont B., Hamon D., Piriou J.Y., Lafond L.R., Le Rhun J., Levasseur J., 1982. Cartes biomorphosédimentaires de la zone intertidale de la côte ouest du Cotentin et de la Baie du Mont Saint-Michel. 7 cartes, *IFREMER Ed.*, 1/25 000.
- Guyon E., Troadec J.P., 1994. Du sac de billes au tas de sable. Editions Jacob, Sciences : 306p.
- Hommeril P., Etude de géologie marine concernant le littoral bas-normand de la zone pré littorale de l'archipel anglo-normand. *Mémoire de thèse Université de Caen-Rouen*, 304p. 1967.
- Katayama H., Satoh M., Ikehara K., 2000. Sedimentological map of Gentatsu-Se. *Geological survey of Japan, Marine Geology Map series, N°53*, 1/200 000.
- Larsonneur C., 1971. Manche centrale et Baie de Seine, géologie du substratum et des dépôts meubles. *Mémoire de thèse doctorat, Université Caen*, 394p.
- Lewis K.B., Garlick R.D., Dawson S.M., 1998. Kaikoura canyon : depths, shelf texture and whale dives. *NIWA Chart Miscellaneous series N° 78*, 1/40 000.
- Maisey G.H., Woien H., 1983. Carte du plateau continental norvégien, Haltenbanken. N°6406. *IKU Ed.*, 1/500 000.
- Paillard M., et al., 1993. Cartographie de l'herbier de posidonie et des fonds marins environnants de Toulon à Hyères. Reconnaissance par sonar latéral et photographie aérienne. *Notice de présentation, Ifremer et Gis Posidonie Pub.*, 1-36, 3 cartes.
- Poppe L.J., Schlee J.S., Butman B., Lane C.M., 1989. Map of the distribution of surficial sediment, Gulf of Maine and Georges Bank. *US Geological Survey and NOAA Ed.*, 1/1 000 000.
- Tauber F., Lemke W., 1995. Meeresbodensedimente in der westlichen Ostsee – Blatt Darss. *Institut für Ostseeforschung, Warnemünde*, 1/100 000.
- Thoulet J., 1907. Précis d'analyse des fonds sous-marins actuels et anciens. *Librairie militaire R. Chapelot Ed.*, 220 p.
- Thouzeau G., Hamon D., Coic D., Grotte A., 1992. Carte des peuplements benthiques des substrats meubles de la Baie de Saint-Brieuc. *IFREMER Ed.*, 1/50 000.
- Vaslet D., Larsonneur C., Auffret J.P., 1978. Carte des sédiments superficiels de la Manche. *BRGM, France*, 1/500 000.
- Wong H.K., Lüdmann T., Baranov B.V., Karp B.Y., Konerding P., Ion G., 2003. Bottom current-controlled sedimentation and mass wasting in the northwestern sea of Okhotsk. *Marine geology*, 201, 287-305.

DEUXIÈME PARTIE



MISSION OCÉANOGRAPHIQUE DU PACIFIQUE

(1^{er} août 2003 - 4 août 2006)

par Jean MEYRAT, ingénieur en chef de l'armement

SOMMAIRE

1. CIRCONSTANCES	6-3
1.1 Introduction	6-3
1.2 Glossaire	6-3
1.3 Contexte - évolutions	6-3
1.4 Typologie de l'activité	6-3
2. TRAVAUX EFFECTUÉS	6-4
2.1 Voies recommandées	6-4
2.2 Levés côtiers et portuaires	6-4
2.3 Géodésie, Spatiopréparation	6-5
2.4 Hydro-océanographie militaire	6-5
2.5 Travaux en coopération	6-6
3. BESOINS COMPLÉMENTAIRES	6-7
3.1 Nouvelle-Calédonie	6-7
3.2 Polynésie	6-7
4. ORGANISATION - MOYENS	6-8
4.1 Organisation	6-8
4.2 Ressources humaines	6-8
4.3 Moyens nautiques	6-8
4.4 Drome	6-9
4.5 Véhicules	6-9
4.6 Matériel hydrographique	6-9
4.7 Informatique	6-9
5. MÉTHODES	6-10
5.1 Hydrographie	6-10
5.2 Qualité	6-11
5.3 Formation	6-11
5.4 HSCT	6-11
6. ÉVOLUTIONS	6-11
6.1 Avantages d'une structure permanente	6-11
6.2 Evolutions à moyen terme	6-12

1. CIRCONSTANCES

1.1 Introduction

Ce rapport rend compte de l'activité de la mission océanographique du Pacifique durant la période du 1^{er} août 2003 au 4 août 2006.

En plus du bilan des travaux, il vise à présenter une synthèse de 3 années de la MOP, dans une période particulièrement riche en évolutions, et à tracer quelques perspectives à moyen terme.

1.2 Glossaire

BGN	: Bureau géodésie-nivellement, bureau de la DITTT
BHNC	: Base hydrographique de Nouvelle-Calédonie
BHPF	: Base hydrographique de Polynésie Française
BS	: Brevet supérieur (d'hydrographe)
CHPF	: Cellule hydrographie de Polynésie française
CPU	: Commission participative de l'unité
DITTT	: Direction des infrastructures, de la topographie et des transports terrestres
DTSI	: Direction de la technologie et des systèmes d'information (ex SMAI)
FA	: Fiche d'amélioration
FEA	: Fiche d'étude d'anomalie
HSCT	: Hygiène et sécurité des conditions de travail
IRD	: Institut de recherche pour le développement
MCN	: Marégraphe côtier numérique
MOP	: Mission océanographique du Pacifique
OMH	: Officier marinier hydrographe
PAR	: Plan d'armement rénové
POM	: Pays d'outre-mer (dénomination actuelle de la Nouvelle-Calédonie et de la Polynésie française)
REA	: Rapid environmental assessment
RGNC	: Réseau géodésique de Nouvelle-Calédonie
RGPF	: Réseau géodésique de Polynésie française
SGVL	: Section de gestion et de valorisation locale
SIG	: Système d'information géographique
SMF	: Sondeur multifaisceaux
SSI	: Sécurité des systèmes d'information
ZEPOLYF	: Programme scientifique d'étude de la zone économique exclusive de Polynésie française, dont le SHOM est partenaire
ZoNéCo	: Programme scientifique d'étude de la zone économique exclusive de Nouvelle-Calédonie, dont le SHOM est partenaire

1.3 Contexte - évolutions

Du point de vue organisationnel, des évolutions majeures ont eu lieu pendant cette période :

- A Tahiti : aboutissement de la convention sur l'hydrographie en janvier 2006, créant officiellement une structure mixte, la CHPF, regroupant les moyens étatiques et polynésiens (matériels, mais aussi ressources humaines) ;
- A Nouméa : projet de refonte de la convention, intégrant une clause de formation au profit d'hydrographes néo-calédoniens, qui seront intégrés aux effectifs de la BHNC.

En ce qui concerne les moyens, on peut noter de nettes améliorations des équipements hydrographiques depuis le début 2005, ainsi que l'arrivée de deux navires flambants neufs utilisés en totalité ou partiellement au profit de l'hydrographie :

- A Nouméa, le *Louis Hénin*, baliseur polyvalent de 30 m ;
- A Papeete, le *Toa Nui*, grosse vedette de 10 m.

En matière de ressources humaines, en attendant l'arrivée effective d'hydrographes locaux (tahitiens ou néo-calédoniens), la situation a été très difficile pendant ces 3 ans, et tout particulièrement à Tahiti, avec seulement deux hydrographes depuis août 2003.

Le volume des travaux terrain a évolué de la façon suivante :

- Tahiti : décroissance depuis la fin 2003, faute d'effectifs, aboutissant en 2006 à un arrêt presque complet afin de viser un achèvement de la rédaction fin 2006 ;
- Nouméa : augmentation sensible en 2004 et 2005, légère diminution en 2006 pour tenir compte du retard de rédaction.

1.4 Typologie de l'activité

Au cours de cette période, des besoins conjoncturels sont apparus :

- nouvelles escales de paquebots ;
- levé de contrôle pour les pétroliers, dans le cadre de la mise en place du plan Polmar en Nouvelle-Calédonie.

D'autres levés ont été menés ou poursuivis dans le cadre de l'industrie du nickel, prépondérante en Nouvelle-Calédonie :

- terminal de chargement de la SLN à Paagoumène ;
- accès aux nouvelles usines de nickel en cours de développement en Nouvelle-Calédonie : usine du nord dans la région de Voh, usine du sud en baie de Prony.

En particulier, ces deux projets métallurgiques ont un impact économique et politique majeur en Nouvelle-Calédonie, et sont placés localement en tête des priorités.

Leurs évolutions respectives, rythmées par les décisions politiques et économiques, ont marqué toute la période 2003-2006.

Ainsi, le projet d'usine du sud a été gelé pendant plus d'un an afin de relancer l'étude de faisabilité, occasionnant par deux fois la déprogrammation d'un levé portuaire prévu dans le cadre de ce projet.

Il faut heureusement signaler que ces projets, prévus de longue date, avaient bien anticipé les besoins complémentaires en hydrographie (en particulier grâce aux pilotes maritimes), si bien que le plus gros des travaux avait déjà pu être réalisé : baie de Prony, accès à la baie de Chasseloup, voie recommandée de Koumac à Paagoumène.

Globalement, au cours de la période 2003-2006, la répartition par types de travaux a évolué vers davantage d'hydrographie générale et militaire au détriment de l'hydrographie civile (recentrage sur le « cœur de métier »).

Compte tenu de ses effectifs, la BHPF s'est limitée à des travaux d'étendue limitée : spatiopréparations, plageages, levés portuaires, mesures hydrodynamiques.

La BHNC a réalisé des travaux variés, et a pu utiliser les nouveaux moyens (baliseur *Louis Hénin*, vedette *Chambeyron*) pour réaliser des levés de voies recommandées autour de la Grande Terre et aux îles Loyauté ainsi qu'à l'île des Pins.

Les deux bases ont bénéficié de concours logistiques importants de la marine nationale et de l'armée de l'air, permettant l'envoi de détachements dans des zones éloignées des ports base (par exemple, archipel des Australes, Wallis et Futuna, plateau des Bellona,...).

2. TRAVAUX EFFECTUÉS

Les travaux font l'objet de rapports particuliers détaillés, dont la liste figure en [annexe 1](#). Ils sont rappelés de manière synthétique ci-dessous.

2.1 Voies recommandées

2.1.1 Nouvelle-Calédonie, accès à Nouméa

Ce levé a été réalisé à la demande des pilotes maritimes de Nouvelle-Calédonie, pour permettre un accès plus aisé à la grande rade de Nouméa.

Il est composé de 3 boîtes, les travaux terrain sont terminés, Les travaux se sont échelonnés de 2003 à 2005 pour les boîtes 2 et 3.

2.1.2 Nouvelle-Calédonie, [Poum](#), accès au mouillage sud de Mouac

Ce levé a été réalisé au profit de la commune de Poum, afin de permettre l'accès de paquebots au mouillage aux abords de Poum.

Il a nécessité deux séances en août et septembre 2003. Les résultats escomptés ont été atteints (nouvelle escale de paquebots ouverte en Nouvelle-Calédonie).

2.1.3 Nouvelle-Calédonie, Poum, accès au mouillage nord de Mouac

Compte tenu du succès de l'escale de Poum, un nouvel accès direct depuis la passe a été demandé pour les paquebots plus importants.

Il a pu être réalisé en une séance, en mars 2004.

Le mouillage nord de l'îlot Mouac est actuellement utilisé par les paquebots, il est beaucoup plus adapté au transfert des passagers vers la côte, la distance étant bien moindre.

2.1.4 Nouvelle-Calédonie, voie recommandée [Thio-Nakety](#)

Cette voie côtière a été ouverte à la demande des pilotes pour la navigation des minéraliers, un seuil compatible avec les besoins a pu être défini.

A noter qu'un nouveau haut-fond a été découvert lors de ce levé. Un avornav a été diffusé.

Ce levé a nécessité deux séances, en juin et août 2004. Il s'agissait de la première utilisation du *Louis Hénin* en levé hydrographique.

2.1.5 Ouvéa, voie recommandée d'accès à Mouly

Cette voie a été ouverte au profit de la province des îles Loyauté, pour permettre le mouillage de paquebots au plus près de la plage de Mouly.

Elle a nécessité une séance en mars 2005.

2.1.6 Nouvelle-Calédonie, voies recommandées lagon sud

Plusieurs voies recommandées complémentaires ont été demandées par les pilotes dans le cadre de la construction de l'usine de nickel du Sud en baie de Prony, afin de tenir compte de l'augmentation de trafic importante que cette construction, puis le fonctionnement de l'usine, occasionnera. Un premier tronçon, élargissant la voie existante entre le canal Woodin et l'îlot Porc-épic, a été réalisé en octobre-novembre 2005.

2.1.7 Nouvelle-Calédonie, voie recommandée aux Belep

La carte en vigueur comporte seulement quelques sondes éparses recueillies dans les années 1880. A la demande du *Jacques Cartier*, mais aussi afin de densifier la connaissance hydrographique de cette zone, une nouvelle voie recommandée a été ouverte entre la passe du D'Estrées de l'île d'Art. La zone de mouillage de la baie d'Aue et son accès ont également été sondés.

Ces travaux ont nécessité deux séances, en mars et avril-mai 2006.

2.2 Levés côtiers et portuaires

2.2.1 Polynésie - Moorea

Une recherche de roche complémentaire à un levé existant a été réalisée à Moorea en septembre 2003.

2.2.2 Nouvelle-Calédonie, levés aux îles Loyauté

Ces levés ont été réalisés en septembre et octobre 2003 au profit de la province des îles Loyauté. Il s'agissait de levés préalables à l'établissement de bases de pêche, à Tadine (Mare), Chépénéhé (Lifou), Waadrilla (Ouvéa).

Un contrôle de la marina de Wé (Lifou) a également été effectué. Le concours logistique de la Province des îles a permis l'acheminement du matériel et du personnel (cargo mixte Havannah).

2.2.3 Polynésie, port de Papeete

Ce levé visait à mettre à jour la bathymétrie et la topographie du port de Papeete, en coopération avec la subdivision des phares et balises (participation de Mlle Eileen Handerson, l'une des deux hydrographes formés à Brest).

Il a été commencé en janvier 2004, et a été complété à plusieurs reprises jusqu'en 2006.

Des mesures de courant ont également été réalisées.

2.2.4 Polynésie, Tuamotu

Un levé bathymétrique et de spatiopréparation a été mené à Tikehau en mars 2004 (recherche de roche, mesures de courant, transects bathymétriques, spatiopréparation).

2.2.5 Nouvelle-Calédonie, levé en baie des Dames

Ce levé a été effectué en mars 2004 dans le but d'assurer un seuil au profit des pétroliers venant mouiller en baie des Dames, à Ducos.

2.2.6 Polynésie, Hao

Une mesure de courant a été réalisée en avril 2004.

2.2.7 Nouvelle-Calédonie, île des Pins, baie de Kuto

Dans le cadre de l'extension du wharf de Kuto, un levé complémentaire a été réalisé en décembre 2004 avec la vedette *Chambeyron*, le soutien logistique (dont le transport de la vedette) étant assuré par le *Louis Hénin*.

2.2.8 Nouvelle-Calédonie, Hienghène

Le levé bathymétrique complémentaire de la baie de Hienghène a été mené en mars 2005 afin d'ouvrir une nouvelle escale de paquebots en baie de Hienghène.

2.2.9 Nouvelle-Calédonie, Port-Boisé

Demandé par la province Sud ainsi que les pilotes maritimes dans le cadre de la construction d'un nouveau wharf en baie de Port-Boisé, ce levé a été réalisé en mai 2005.

2.2.10 Nouvelle-Calédonie, Mont-Dore

Ce levé a été réalisé en septembre 2005, en vue d'aménagements côtiers.

2.2.11 Polynésie – Bora Bora

En juin 2006, des travaux de nivellement complémentaires ont été réalisés à Bora Bora par la BHPF. Ce déplacement a également permis d'effectuer un contrôle bathymétrique à la pointe Matira, à la demande de la Polynésie.

2.2.12 Wallis et Futuna

A la demande du service des travaux publics de Wallis et Futuna, des contrôles bathymétriques en vue de la mise en place de balisage et de l'aménagement du chenal d'accès à Mata Utu ont été réalisés à l'occasion du levé de juin-juillet 2006.

2.3 Géodésie, Spatiopréparation

En Polynésie, les travaux nécessaires à la définition des lignes de base ont été achevés en 2003. Des travaux complémentaires ont été réalisés pour le rattachement au RGPF en 2004 et 2005.

En Nouvelle-Calédonie, les lignes de base font l'objet d'un décret paru en 2002. Toutefois, des travaux complémentaires ont été nécessaires pour le rattachement au RGNC dans le cadre de la mise à jour de la cartographie des récifs isolés.

2.3.1 Polynésie, Tuamotu

Des spatiopréparations complémentaires ont été réalisées en 2004 et 2005 aux Tuamotu :

- Mars 2004 : Tikehau ;
- Juin 2004 : Haraiki, Iti, Amanu ;
- Septembre 2004 : Tahanea ;
- Mai 2005 : Katiu, Rarka, Motutunga.

2.3.2 Polynésie, Marquises

Des travaux complémentaires de rattachement au RGPF ont eu lieu aux Marquises en décembre 2003 : Motu Iti, Fatu Huku, Mohotani, Tahuata.

2.3.3 Wallis et Futuna

La spatiopréparation de Wallis, demandée par l'EPSHOM, a pu être complètement achevée lors du levé de mai 2004. Celle de Futuna, commencée lors de ce levé, a été achevée en juillet 2006 (cf. ci-dessous).

2.3.4 Nouvelle-Calédonie, Bellona

Les travaux de spatiopréparation, commencés début 2003, ont pu être complètement achevés en novembre 2004 du fait de conditions météorologiques exceptionnelles. Ainsi, la totalité des plateaux affleurant des Bellona, très étendus, a pu être spatiopréparée.

2.3.5 Nouvelle-Calédonie, Fairway-Nereus

La spatiopréparation des ces plateaux faiblement immergés a été tentée en octobre 2005 avec le concours du **P400 La Moqueuse**.

Les mauvaises conditions météorologiques n'ont pas permis de travailler.

Dans cette zone au large n'offrant aucune protection, seules des conditions météo exceptionnelles permettraient de mener à bien cette spatiopréparation par les moyens classiques (coralline ou zodiac).

2.3.6 Futuna

La spatiopréparation a pu être achevée en juillet 2006, lors du déploiement de la BHNC sur zone.

2.4 Hydro-océanographie militaire

2.4.1 Polynésie, Australes

A la demande de **COMSUP** PF, des contrôles de plageages et embectages ont été réalisés en février 2004 aux Australes : Rapa et Raivavae.

2.4.2 Polynésie, Mururoa

Un levé de quai ainsi qu'un contrôle du balisage ont été menés à Mururoa en novembre 2003.

2.4.3 Nouvelle-Calédonie, baie de Ngo

A la demande du *Jacques Cartier*, la BHNC a réalisé en février 2004 un contrôle bathymétrique expédié de la baie de Ngo, dans le cadre de l'étude de faisabilité de l'ouverture d'un nouveau site de plageage.

2.4.4 Nouvelle-Calédonie, Lifou

Dans le cadre de la préparation de l'exercice Croix du Sud 2004, la BHNC a réalisé un levé de plage à Lifou en avril 2004.

2.4.5 Wallis et Futuna

Le plageage de Halalo à Wallis a été contrôlé, et un nouveau site de plageage a été recherché à Futuna lors du déploiement de la MOP en mai 2004.

2.4.6 Polynésie, port militaire de Papeete

Ce levé, demandé par le COMAR PF, a été commencé début 2004 et a été poursuivi en fonction des disponibilités de la BHPF. Sa rédaction a achevée en juin 2006.

2.4.7 Nouvelle-Calédonie, Croix du sud 2004

La MOP a participé à la phase REA de l'exercice Croix du Sud 2004, à bord du bâtiment néo-zélandais *Manawanui* en juin 2004.

Cet exercice amphibie international se tient actuellement tous les deux ans.

Il regroupe des participants (forces maritimes, terrestres et aériennes) des principaux pays de la zone : Australie, Nouvelle-Zélande, Fidji, Tonga, Vanuatu, Papouasie - Nouvelle Guinée.

Le REA était le premier exercice conduit à l'extérieur par la Nouvelle-Zélande.

Un compte rendu a été rédigé, mettant notamment l'accent sur l'apport des systèmes d'information géographiques pour la génération de produits multicouches utilisables facilement et rapidement par les états-majors.

2.4.8 Nouvelle-Calédonie, Base Navale de Nouméa

En juin-juillet 2005, la BHNC a levé les quais de la base navale de Nouméa et leur accès à la demande du COMAR NC.

2.4.9 Nouvelle-Calédonie, Houailou

Dans le cadre de la préparation de l'exercice Croix du Sud 2006, le site de plageage de **Meomo**, au nord de Houailou devait être contrôlé en priorité.

Ce contrôle a été réalisé en novembre 2005.

2.4.10 Nouvelle-Calédonie, Croix du Sud 2006

La MOP a participé à la phase REA de l'exercice Croix du Sud 2006, à bord du bâtiment néo-zélandais *Resolution* en avril 2006 en baie de Canala.

L'ensemble des composantes du REA a pu être joué : recueil préliminaire d'information élaborées (imagerie satellite haute résolution et données géographiques numériques fournies par la DITTT), levé au SMF des voies d'accès, levé bathymétrique au sondeur vertical, topographie de la plage, recueil d'informations de type renseignement, traitement et production de produits intermédiaires par SIG, diffusion des données, réalisation effective du débarquement (Batral *Jacques Cartier*).

Cet exercice a fait l'objet du compte rendu cité en **annexe 2**.

2.5 Travaux en coopération

2.5.1 ZoNéCo

Ce programme scientifique a permis la mise en place, en février 2005, du MCN de Nouméa, premier MCN à avoir été installé outre-mer.

Ce marégraphe est régi par une convention tripartite entre le SHOM, la DITTT et l'IRD.

Il devrait à brève échéance être relié au réseau mondial d'observation des océans GLOSS, et devrait rapidement remplacer le marégraphe entretenu à Nouméa par l'université de Hawaï dans le cadre du réseau d'alerte contre les tsunamis.

Rattaché dès l'origine à l'ellipsoïde, il fait l'objet d'une surveillance altimétrique régulière par la DITTT, et pourrait être prochainement équipé d'un récepteur GPS permanent.

Son contrôle complet a été réalisé en mars 2006.

La MOP a participé aux réunions élargies du programme ZoNéCo.

Ce programme, après une année 2005 de transition, a été relancé grâce au contrat de développement 2006-2010.

Le SHOM y participe via une convention sur la numérisation des minutes anciennes du lagon au profit de la DTSI. Fin juillet 2006, la DTSI était en cours de consultation pour le choix d'un prestataire assurant cette numérisation. Le SHOM fournit quant à lui les minutes sous forme de scans grand format.

Le SHOM a également participé à la campagne ZoNéCo 11 en fournissant deux OMH de la MOA embarqués sur l'Atalante en août – septembre 2004. L'objectif essentiel de cette campagne était l'investigation bathymétrique et sédimentologique de zones pouvant intéresser l'extension du plateau continental juridique.

La MOP a également reçu dans ses locaux une équipe du comité directeur du projet EXTRAPLAC en juin 2004.

2.5.2 ZEPOLYF

La BHPF a bénéficié d'une formation au logiciel Caraïbes à l'université du Pacifique en septembre 2003 en vue de traiter des données SMF recueillies dans le cadre de ZEPOLYF.

L'effectif disponible n'a malheureusement pas permis de donner suite, étant donné le retard de rédaction existant.

Le projet Zepolyf, ayant atteint les objectifs assignés, a été clôturé en 2005.

2.5.3 DITTT

D'excellentes relations ont été entretenues avec la DITTT, elles ont permis de développer les coopérations déjà existantes : prêt de matériel, observations complémentaires dans le cadre de la surveillance du MCN, fourniture réciproque des données géodésiques et de nivellement recueillies, fourniture de données géoréférencées pour la préparation de levés (orthophotos, trait de côte, cartes numérisées).

Un levé a même été réalisé en coopération avec la DITTT (baie de Kuto, décembre 2004, prêt par la DITTT d'un couple de GPS Trimble et participation d'un technicien).

2.5.4 Forces armées

En Polynésie comme en Nouvelle-Calédonie, les levés lointains rappelés ci-dessus n'auraient pu se faire sans le concours des forces armées : concours aériens permettant des gains de temps très importants et concours maritimes (P400, Batral, RR) pour l'acheminement d'un détachement et de tout son matériel.

Par ailleurs, la MOP a à plusieurs reprises été sollicitée par les COMAR pour la fourniture d'informations géographiques. En plus de la participation déjà évoquée aux exercices REA, la MOP a été mise à contribution en servant de point focal pour la fourniture d'informations géoréférencées dans le cadre de l'expédition Vanikoro 2005 (déploiement du *Jacques Cartier* à Vanikoro en soutien logistique) : données de marée prédite, cartes anciennes scannées, photos aériennes obtenues auprès de l'association Salomon, données SMF recueillies par l'*Alis* (navire de l'IRD).

La participation de la MOP à l'expédition, un temps envisagée, n'a finalement pas été demandée.

Plus classiquement, à Papeete comme à Nouméa, la MOP a été régulièrement sollicitée pour la fourniture d'informations complémentaires au profit des bâtiments de la Marine (tirage de minutes, marée prédite, limites de ZEE,...).

2.5.5 DTSI

La DTSI est une direction centralisée de la Nouvelle-Calédonie dont la vocation est le soutien informatique de toutes les administrations locales.

Elle possède également un service géomatique gérant des bases de données relatives à l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie.

C'est dans ce service qu'est localisée la SGVL, assurant la gestion et l'archivage des données de ZoNéCo, et notamment les minutes SHOM numérisées et les données numériques des levés récents.

Ce service géomatique comprend un département imagerie réalisant l'exploitation d'imagerie satellitaire et aérienne au profit de la Nouvelle-Calédonie : suivi des feux de brousse, cartographie de la végétation, surveillance du récif corallien.

Ce département possède notamment la couverture SPOT 5 de la totalité de la Nouvelle-Calédonie, ainsi que des images satellite haute résolution réparties sur le territoire.

Des coopérations ont été menées, notamment dans le cadre de la préparation de levés de plage ou portuaires, la DTSI fournissant des images approximativement géoréférencées, la MOP réalisant des points de calage sur le terrain pour améliorer ce géoréférencement.

A plus grande échelle, une demande de calage sur toute la Nouvelle-Calédonie, visant à préciser le géoréférencement des récifs, a été adressée à la MOP par la DTSI.

Cette demande représente un travail important qui a pour l'instant seulement été commencé aux abords de Nouméa avec la vedette *Chambeyron*.

Si cette demande est toujours d'actualité, des méthodes plus productives (en particulier **l'hélicoptère**) devront être envisagées.

3. BESOINS COMPLÉMENTAIRES

3.1 Nouvelle-Calédonie

Une étude approfondie d'analyse des besoins hydrographiques a été réalisée (cf. fiche n° 200 MOP/DR du 3 août 2006 citée en annexe 2, et figurant en pièce jointe).

En résumé, elle met en évidence les conclusions suivantes :

- Les voies recommandées prescrites par les instructions techniques d'avril 1998 ont été terminées pour la plupart, leur complet achèvement représenterait environ 2 ans de travaux avec le potentiel actuel de la BHNC ;
- Les besoins exprimés en matière d'hydrographie générale (voies recommandées) représentent un potentiel glissant de l'ordre de 5 ans et sont évolutifs : une certaine autorégulation est constatée lors des commissions hydrographiques ;
- D'autres besoins exprimés (hydrographie exhaustive de zones non hydrographiées) représentent un potentiel considérable de la BHNC (atteignant 15 ans de travail à plein temps) et ne présentent pas d'intérêt évident pour la navigation. Des moyens plus expéditifs, comme le laser aéroporté, seraient plus appropriés.

En conclusion, la **commission hydrographique** est un outil bien adapté au recueil des besoins hydrographiques, ses membres font preuve de pragmatisme et de responsabilité dans l'arbitrage des priorités.

S'il subsiste des zones non ou très peu hydrographiées, les voies recommandées actuellement demandées par les professionnels représentent un volant d'activité d'environ 5 ans avec le potentiel actuel de la BHNC. Par rapport aux instructions techniques de 1998, des ajustements dans les priorités et de nouvelles perspectives (dont la route traversant le grand lagon nord) apparaissent, ils sont détaillés dans la fiche.

Globalement, la BHNC a atteint un rythme de croisière, avec un plan de charge de plusieurs années glissantes.

3.2 Polynésie

En Polynésie, le levé des passes prioritaires a été achevé avant le départ de l'*Arago*.

Toutefois, l'hydrographie dans les atolls n'est que très partielle, se résumant en général au levé de la passe principale et de l'accès au village.

De plus, des zones non hydrographiées subsistent en particulier aux Marquises, dont le levé est régulièrement demandé par la marine.

Par ailleurs, même dans les zones considérées comme correctement hydrographiées, les levés ne sont pas toujours adaptés aux nouvelles applications nécessitant une sécurité sans faille : tourisme de croisière avec des tirants d'eau en augmentation, augmentation du tirant d'eau pour le trafic de marchandises.

Il faut aussi souligner qu'à plusieurs reprises du balisage a été mis en place sans levé hydrographique préalable : des levés devront être faits a posteriori.

Enfin, des aménagements portuaires récents nécessitent des levés adaptés, ce qui n'est malheureusement pas souvent le cas, les levés bathymétriques de recollement étant généralement exécutés par des géomètres sans compétence hydrographique.

La première commission hydrographique de Polynésie française, qui s'est tenue le 27 juin 2006 dans le but d'étudier la programmation des travaux de la CHPF en 2007 a ainsi recensé pas moins de 38 demandes de travaux, dont des levés conséquents au profit du tourisme de croisière (baies de Moorea, chenal intérieur au lagon de Huahine). Cela suffit à justifier, s'il en était besoin, l'intérêt des commissions hydrographiques locales.

Compte tenu du potentiel de la CHPF, les besoins exprimés à la commission hydrographique représentent plusieurs années de travail. Tout comme en Nouvelle-Calédonie, il est probable que de nouveaux besoins apparaîtront chaque année, et qu'un rythme de croisière, avec un plan de charge de plusieurs années glissantes, sera trouvé.

4. ORGANISATION - MOYENS

4.1 Organisation

Depuis août 2003, la MOP est organisée en 2 bases très similaires : la BHNC et la BHPF.

Placées sous l'autorité du directeur de la MOP, ces 2 bases sont gérées au quotidien par un OMH (MP à Nouméa et MJR à Papeete).

Le service logistique de la MOP, par nature transverse, est dirigé par l'ingénieur logisticien basé à Papeete.

Ce dernier a également assuré un rôle de représentation du directeur auprès des autorités locales, notamment dans le cadre de la négociation de la convention sur l'hydrographie avec la Polynésie.

4.2 Ressources humaines

Compte tenu des besoins exprimés en Nouvelle-Calédonie, la direction du SHOM a procédé au rééquilibrage des effectifs entre Papeete et Nouméa, en affectant en août 2003 le directeur à Nouméa au lieu de Papeete, et en transférant un poste d'OMH plongeur de Papeete vers Nouméa.

En complément, le poste de MJR chef de base a été transféré de Nouméa vers Papeete.

Ces modifications sont entrées en vigueur en septembre 2004. Les effectifs militaires sont restés stables : 8 personnes (dont 4 OMH) à Nouméa, 7 personnes (dont 2 OMH) à Papeete, à l'exception d'un supplément au plan d'armement d'une personne (un MP hydrographe) pendant un an, d'août 2005 à août 2006.

La MOP format 2003-2006 est donc bien loin des formats qui ont prévalu par le passé : à peine le tiers des 45 personnes que la MOP a comptées autrefois.

Les postes d'ingénieurs sont répartis entre le directeur et directeur technique à Nouméa, et le chef du service logistique à Papeete.

La BHNC bénéficie depuis la fin 2003 d'une fonctionnaire de la Nouvelle-Calédonie mise à disposition pour assurer le secrétariat.

Le poste de secrétaire de la BHPF a été transformé en 2006 dans le cadre du PAR en poste de radio adjoint logistique.

En Nouvelle-Calédonie, un renfort d'un OMH serait nécessaire afin de tirer le meilleur parti du *Louis Hénin* (80 jours de potentiel annuel utilisable, qui serait porté à 90 jours dans le projet de refonte de la convention).

Demandé, mais non obtenu, dans le cadre du PAR, ce renfort devrait se concrétiser dès la mi-2007 (arrivée de la première hydrographe néo-calédonienne, actuellement en formation à Brest).

L'effectif total d'hydrographes néo-calédoniens à la BHNC devrait atteindre 2 personnes en août 2008, puis peut-être 4 en août 2009.

En Polynésie, la réduction d'effectifs à 2 OMH, censée accompagner la mise en place de la structure mixte Etat-Polynésie, est intervenue dès août 2003, alors que la convention a été signée en janvier 2006 seulement, et que la Polynésie n'a pas encore affecté de personnes à cette structure.

La BHPF a donc connu pendant 3 ans une situation très difficile, qui a dû conduire à limiter au minimum les travaux terrain au profit de la rédaction.

L'effectif hydrographe total de la CHPF, de 4 personnes, devrait quand il sera finalement réalisé, être bien adapté aux travaux à réaliser.

4.3 Moyens nautiques

4.3.1 Navires et vedettes hydrographiques

Nouvelle-Calédonie

La MOP dispose de 80 jours de *Louis Hénin* par an pour l'hydrographie (quota qui devrait être porté à 90 jours dans la future version de la convention), sur un total théorique de 180 jours.

Le reste du potentiel est consacré au balisage et à des missions scientifiques, en coopération avec l'IRD notamment.

Ce navire neuf et confortable est bien équipé et bien adapté à l'hydrographie, bien que son faible tirant d'eau et son fardage rendent la tenue de profil difficile en cas de vent latéral.

Il dispose d'un laboratoire humide, d'une salle de traitement, d'un PC scientifique attendant à la passerelle, d'un réseau informatique, de bases sondeurs fixes.

Pour ses missions de balisage, il est équipé d'une grue puissante, qui peut être utilisée pour le chargement et la mise à l'eau de la vedette *Chambeyron*.

Il possède un treuil d'hydrologie et peut être équipé de treuils électriques télécommandés : treuil sondeur latéral et treuil de prélèvement.

Ses capacités d'accueil se limitent malheureusement à 4 personnes (pour un équipage de 8 personnes).

La MOP dispose à plein temps d'une vedette hydrographique de 7 m mise en service en 2002, le *Chambeyron*, un Ramco en aluminium adapté à l'hydrographie, équipé de bases sondeur fixes et pouvant mettre en œuvre le sondeur latéral.

La VH8 *Popinée* affectée à la BHNC n'est plus utilisée depuis l'arrivée du *Chambeyron*, son déclassement a été demandé en janvier 2005 par la MOP et est en cours (vente au domaine).

Polynésie

La BHPF dispose de 2 VH8, *Matthew* et *Hunter*, dont une en cours de déclassement.

Elle devrait par la suite utiliser principalement la vedette de 10 m *Toa Nui*, construite par la Polynésie, et théoriquement apte à naviguer jusqu'à 200 milles du port base.

4.4 Drome

La BHNC et la BHPF disposent chacune d'une coralline de 5,45 m. Si les coques sont en bon état, la motorisation est indisponible : à Nouméa, le moteur a été mis hors d'état lors d'un retournement en 1999 et n'a pas depuis été remplacé ; à Papeete, il doit être déclassé et devra donc être remplacé.

La BHNC ne dispose plus que d'un zodiac sur les deux figurant au plan d'armement, le deuxième ayant été déclassé début 2006. Son remplacement a été demandé.

Le plus critique est l'état des moteurs hors-bord de 40 cv, déclassés l'un après l'autre, leur renouvellement a été demandé.

En ce qui concerne les remorques, à la BHNC, celle du zodiac déclassé est hors service et celle de la coralline est en mauvais état.

4.5 Véhicules

La BHPF dispose de deux véhicules Marine relativement récents, un Boxer et une 306 Break, leur renouvellement n'est pas encore à l'ordre du jour, il devrait être assuré par la Polynésie selon la convention.

La BHNC devrait disposer de 4 véhicules : un 4x4 et un VL fournis par la Marine, un 4x4 et un VL fournis par la Nouvelle-Calédonie.

Actuellement, la Nouvelle-Calédonie a fourni deux véhicules récents : un 4x4 Toyota Hilux et une Saxo, et la Marine un 4x4 Land-Rover Defender récent.

Un véhicule Marine de type Kangoo devait arriver début 2006, mais a été annulé faute de crédits.

Afin de pallier cette situation, la Nouvelle-Calédonie a mis temporairement à la disposition de la BHNC une 306 ancienne.

4.6 Matériel hydrographique

4.6.1 Plan d'équipement

Le matériel hydrographique en 2003 était obsolète et sous-dimensionné : sondeurs DESO 20 à Tahiti, DESO 17 à Nouméa, un seul couple d'Aquarius à Nouméa.

Suite à des demandes d'évolution et grâce au soutien de l'EPSHOM, le plan d'équipement a beaucoup évolué qualitativement et quantitativement, notamment depuis 2005.

Ainsi, la MOP est à présent équipée de sondeurs EA 400 et de modules d'acquisition numérique du sonal Edgetech, qu'elle a d'ailleurs été la première mission à mettre en œuvre.

En Polynésie, l'EPSHOM a accepté de mettre à jour le plan d'équipement avant fourniture à la cellule hydrographie mixte, sachant que le renouvellement de ce matériel, dans le futur devrait être assuré par la Polynésie.

La Polynésie quant à elle, a fourni un matériel minimal récent : sondeur monofaisceau, un couple d'Aquarius, un sonal numérique, un bathycélérimètre, deux courantomètres,...

Actuellement les points noirs à la MOP restent l'état des poissons sondeur latéral 272 TD et des câbles électroporteurs, et surtout le manque de récepteurs GPS cinématiques.

Les Aquarius présentent fréquemment des défaillances à haute température et ne sont donc guère adaptés à une utilisation dans le Pacifique.

A court terme, il est prévu d'augmenter leur nombre pour assurer une redondance suffisante, en attendant les nouveaux récepteurs GPS cinématiques achetés par le SHOM.

4.6.2 Transferts de matériel

Les deux implantations de la MOP sont confrontées à un problème important compliquant les échanges entre elles et avec l'EPSHOM : les contraintes de douanes.

Les difficultés liées à la douane retardent les acheminements de matériel, induisent des frais et consomment du potentiel humain de la mission.

C'est pourquoi, ces transferts devraient être réduits au minimum.

Faute de matériel en quantité suffisante, de fréquents transferts Papeete-Nouméa ont dû être effectués pendant la période 2003 – 2006, pour pouvoir réaliser des levés programmés.

Autre problème lié aux transferts de matériel : les délais non maîtrisés. Ainsi, jusqu'en 2005, l'utilisation du service de transit interarmées pour un envoi de Nouméa vers l'EPSHOM a conduit à des retards de plusieurs semaines non maîtrisables, et préjudiciables à la planification des travaux.

Cette situation devrait s'améliorer avec la passation par l'EPSHOM d'un marché global relatif aux transports de matériel. Début 2006 toutefois, il n'a pas été possible d'envoyer de matériel avant fin février, compromettant le planning d'étalonnage.

4.7 Informatique

4.7.1 Logiciel

La MOP utilise depuis septembre 2003 le logiciel d'acquisition et de traitement Hypack Max.

En acquisition et en traitement, ce logiciel donne satisfaction et permet un gain de temps et d'efficacité par rapports aux anciennes chaînes de traitement. Il bénéficie d'un support réactif dans le cadre du projet CHATDHOC.

Le module de tracé de documents définitifs pourrait être amélioré :

- graphismes trop limités obligeant encore à des ajouts manuels ;
- module non « wysiwyg », obligeant à des tâtonnements et donc à des pertes de temps ;
- quelques bogues signalés sur les graduations sexagésimales ;
- insertion d'un titre laborieuse (passage par word, puis Acrobat Distiller pour insérer le titre en tant qu'image).

La solution d'utiliser Caris Gis pour la production de documents définitifs, voire Caris Hips pour le traitement devrait être étudiée.

Elle a été adoptée par exemple par les Néo-Zélandais, qui n'utilisent Hypack que pour l'acquisition, puis réalisent toute le traitement sous Caris.

Les logiciels utilisés sont par ailleurs ceux mis à disposition par le projet CHATDHOC : Timica en marée et célérité, GeoGenius et TTC en géodésie, les logiciels constructeurs SEALOG pour programmer et vider les appareils...

4.7.2 Matériel

La dotation en postes de travail est maintenant très satisfaisante, avec notamment l'arrivée de postes bi-écran initialement destinés à Caris, pour l'exploitation du sonal acquis sous forme numérique.

Par rapport aux autres missions, seul manque un système automatisé de sauvegarde et d'archivage, devenu nécessaire compte tenu des volumes très importants générés par le sonal acquis en numérique.

4.7.3 Réseaux

Depuis octobre 2004, la BHNC et la BHPF sont reliés au réseau du SHOM via un VPN (virtual private network) : les deux sites peuvent être considérés comme un sous-réseau du réseau SHOM.

En-dehors de nouvelles fonctionnalités comme les adresses e-mail nominatives, cela a permis une simplification de l'administration locale du réseau et une centralisation de la SSI (l'antivirus est fourni par l'EPSHOM, chaque poste connecté étant automatiquement synchronisé).

Pour l'utilisateur, la situation est la même qu'à l'EPSHOM, avec un débit bien plus faible étant donné que, même avec un forfait ADSL, les signaux doivent être transmis par satellite jusqu'à Brest (Nouméa n'est pas encore desservie par un câble sous-marin).

A titre d'exemple, à Nouméa la vitesse habituelle constatée de téléchargement est d'environ 7 ko/s.

Début 2006, une extension du réseau sur la base des Phares et Balises de Nouméa a permis de raccorder l'atelier et le local archives au bâtiment principal, ainsi que d'installer une prise réseau dans le local du MCN : ces locaux pourront donc être raccordés au réseau SHOM.

Enfin, une machine raccordée au réseau « RECIF » de la Nouvelle-Calédonie devrait prochainement être disponible à la BHNC, permettant l'échange d'informations avec les administrations locales.

5. MÉTHODES

5.1 Hydrographie

5.1.1 DGPS par GPRS

La DITTT a mis en service en 2004 un service de corrections différentielles GPS par GPRS. Ce service a été testé fin 2005 et début 2006 par la MOP : ces essais font l'objet d'une fiche citée en annexe 2.

Les conclusions principales sont les suivantes :

- En mode DGPS de code, précision métrique tout à fait adaptée aux levés d'ordre 1, grande stabilité de la réception des corrections ;
- En mode DGPS cinématique (de phase), les tests effectués avec l'Aquarius ont montré des sauts importants, sans doute dus à un paramètre d'âge maximal des corrections différentielles trop élevé.

Sous réserve d'être en portée GSM, la localisation en DGPS de code par GPRS serait bien adaptée à la plupart des levés lagonnaires à bord du *Louis Hénin*.

Elle permettrait de s'affranchir des stations différentielles à terre dans ce type de levé.

5.1.2 Acquisition numérique du sondeur latéral

Effective depuis août 2005, elle a fait l'objet d'une évaluation par la MOP (fiche citée en annexe 2).

L'interface temps réel est efficace et conviviale. Le traitement avec Hypack est intuitif et rapide.

En particulier, le fait de disposer très rapidement de données géoréférencées constitue un gain de temps important par rapport à la bande papier.

Les fonctionnalités de cotation et de sauvegarde des échos permettent une bonne traçabilité du traitement.

En revanche, étant donné les volumes de données importants recueillis (750 Mo/h), il faudra rapidement définir la stratégie de sauvegarde de ces données.

5.1.3 Topographie de plage

Lors de levés de plage réalisés par la MOP, la topographie de la plage a été acquise en GPS cinématique, soit en temps réel, soit en temps différé.

Les hauteurs ellipsoïdales ont été converties en sondes en utilisant deux méthodes distinctes :

- Application du décalage zéro hydrographique / ellipsoïde connu en un observatoire de marée proche ;
- Nivellement du plan d'eau et, par correction de marée, du zéro de réduction des sondes, par rapport au point de référence de la plage (connu en 3D par rapport à l'ellipsoïde), à plusieurs instants distincts.

Ces deux méthodes, expérimentées en novembre 2005 à Meomo et en juillet 2006 à Futuna, ont donné des résultats très cohérents.

Enfin, pour pouvoir importer aisément la topographie calculée en temps différé sous Hypack, un nouveau format d'export a été défini pour geogenius.

Ce format a été transmis au projet CHATDHOC.

5.1.4 Recherches plongeurs

Deux embarcations sont utilisées : la vedette hydrographique et le zodiac des plongeurs.

La vedette mouille (profil Hypack) un jalon à la position théorique de la recherche (par un système à contrepoids, le jalon a toujours la longueur voulue).

Les plongeurs descendent le long du jalon, font leur circulaire et repositionnent le jalon sur le point haut.

A l'issue, la vedette effectue un passage en croix au ras du jalon afin de repositionner précisément la remontée (et accessoirement d'en avoir une cote sondeur).

Cette procédure a permis une grande productivité dans les recherches, parfois très nombreuses comme pour le levé de la baie des Dames.

Afin de pouvoir intégrer dans Hypack autrement que manuellement le résultat des recherches plongeurs, un programme gérant le tracé et l'intersection des cercles plongeurs a été développé et fourni au projet CHATDHOC.

5.1.5 Marée prédite

Le programme marmonde de calcul de la marée prédite en fonction de la position géographique a été testé (cf. fiche citée en annexe 2).

Les résultats ont été comparés sur deux zones à la marée observée, les marées prédites et observées sont cohérentes. Marmonde est couramment utilisé pour produire des fichiers de marée prédite utilisés en temps réel et en début de traitement (avant la récupération de la marée observée). Ces fichiers sont bien sûr remplacés ensuite par les fichiers de marée observée.

5.1.6 Géoréférencement des cartes scannées

Hypack permet d'afficher en fond d'écran des cartes scannées ou des images à condition de les géoréférencer. Cette fonctionnalité a été largement utilisée, pour afficher des cartes SHOM scannées, des scènes SPOT approximativement géoréférencées, des orthophotos.

5.1.7 Appartenance sur l'ellipsoïde

La MOP a pris le parti d'utiliser les fonctionnalités existantes de Hypack pour définir les sondes à l'intérieur d'un polygone (« surface minimale englobante » selon la norme relative au format pivot de bathymétrie).

Cela permet d'éviter d'avoir recours à des artifices extérieurs lors du traitement.

Or, Hypack travaillant en projection, les notions d'intérieur doivent être précisées lorsqu'on travaille sur l'ellipsoïde (ce qui est le cas avec le format pivot).

Une fiche a été rédigée à ce sujet et est citée en annexe 2. Elle montre que le logiciel actuellement utilisé à l'EPSHOM pour vérifier l'appartenance des sondes à un polygone n'est pas adapté aux longs arcs de polygone car il utilise implicitement une projection qui n'est pas conforme, la projection « plate carrée ».

Ainsi, des écarts à l'orthodromie atteignant 10 m sont constatés pour des longs arcs de polygones (25 km).

Elle établit aussi sur des cas particuliers que la droite en projection UTM (projection usuelle de travail à la MOP), utilisée par Hypack pour ses tests d'appartenance, se rapproche beaucoup plus de l'orthodromie (moins de 0,5 m sur un arc de 25 km).

L'utilisation des fonctionnalités standard de Hypack pour le découpage des lots semble donc légitime.

Cette problématique de l'appartenance à un polygone a fait l'objet d'une FA.

5.2 Qualité

Dans la mesure de ses moyens, la MOP a participé à la mise en place du système de management de la qualité.

Un audit interne et des formations ont eu lieu en octobre 2005.

Il a permis d'ouvrir une trentaine de fiches (FA et FEA).

Un audit externe de suivi de la certification a eu lieu le 8 mars 2006.

Il a mis en évidence l'éloignement de la MOP et son manque de ressources (faiblesse des effectifs, difficultés logistiques). D'un point de vue technique, une clarification des procédures relative à la SSI et à la l'étalonnage des capteurs bathymétriques a été demandée.

5.3 Formation

Compte tenu de l'éloignement géographique, les formations sont difficiles à réaliser, mis à part la formation interne à la MOP, réalisée à chaque fois que possible (exemple : Timica, système de gestion de la documentation).

Toutefois, plusieurs formations importantes ont pu être réalisées :

Hypack en septembre 2003 (MT Laurent Mainguéné) ;
Timica et logiciel d'exploitation du MCN en février 2005 (M. Bernard Croguennoc) ;
EA 400 et Miosotis en mai 2005 (IETA Yan Dupont) ;
Qualité en octobre 2005 (ICETA André Leroux et EV Magali Duval).

5.4 HSCT

Les 2 bases BHPF et BHNC ont été pleinement intégrées à l'organisation locale HSCT.

Ainsi, des fiches emploi nuisance sont rédigées et tenues à jour, l'instruction permanente sur l'HSCT a été mise à jour, des séances de formation au centre d'entraînement sécurité ont été organisées, ainsi que des formations AFPS grâce aux bases navales de Nouméa et Papeete.

6. ÉVOLUTIONS

6.1 Avantages d'une structure permanente

L'analyse présentée au paragraphe 3 montre que les besoins restent importants et évoluent sur une période caractéristique de 5 à 10 ans : industrie minière en Nouvelle-Calédonie, surveillance maritime et besoins militaires, fret et tourisme en Polynésie et en Nouvelle-Calédonie.

Compte tenu de ces besoins, une structure permanente du SHOM dans le Pacifique a pleinement sa place, avec les avantages considérables que cela comporte :

- réactivité en cas d'urgence (exemple : levé après cyclone, évacuation de ressortissants) ;
- entretien de la connaissance locale (réseaux géodésiques, observatoires de marée) ;
- développement des coopérations locales et entretien d'un réseau de correspondants ;
- expertise, voire transfert de compétence au profit des pays d'outre-mer ;
simplification de la logistique avec l'EPSHOM (intégration locale permettant la meilleure prise en compte des contraintes, de douane notamment) ;
- aide au recueil et à l'expression des besoins, dans le cadre de commissions hydrographiques ;
- optimisation du recueil et, dans une certaine mesure, contrôle de l'information nautique ;

- prépositionnement de moyens nautiques et logistiques adaptés et disponibles ;
- exécution de travaux spécifiquement militaires ;
- assistance et expertise technique au profit de la Marine ;
- représentation et rayonnement du SHOM (commissions maritimes régionales, échanges avec les services hydrographiques du Pacifique).

D'un point de vue gestion des ressources humaines, un autre argument souvent avancé en faveur du maintien d'une structure permanente du SHOM dans le Pacifique est l'attrait de ce type de postes et l'expérience qu'ils permettent d'acquérir (grande autonomie, coopérations diverses, missions variées...).

Il convient toutefois de relativiser la puissance de cet attrait étant donné les résultats observés lors des études relatives au moral (CPU, grilles d'analyse du moral) : le moral est globalement tout juste bon, du fait des conditions de travail difficiles en situation de sous-effectif, de l'éloignement (contraintes logistiques et aussi familiales et personnelles), et surtout de la baisse constatée de pouvoir d'achat ces dernières années (fin de la majoration d'embarquement en octobre 2003, coût plus important de la couverture sociale, fin du logement gratuit, difficulté de trouver du travail pour le conjoint,...).

6.2 Évolutions à moyen terme

Les possibilités de transferts de compétence découlent des lois organiques portant statut de la Polynésie (2004) et de la Nouvelle-Calédonie (1999).

La situation est différente entre ces deux POM.

Polynésie

La loi organique de 2004 (et auparavant celle de 1996) prévoit que la Polynésie est compétente en matière de sécurité de la circulation maritime dans la mer intérieure.

Cela signifie en pratique l'essentiel des travaux hydrographiques utiles à la navigation (en particulier les lagons, la plupart des baies).

L'Etat conserve pour sa part la responsabilité dans le reste de la ZEE.

L'interface la plus évidente se situe au niveau des passes, dont l'intérieur est de la responsabilité de la Polynésie et l'extérieur de celle de l'Etat.

Cette dualité a présidé à la mise en place de la CHPF, afin de réaliser des économies d'échelle : plutôt que de mettre en place une structure polynésienne et une structure étatique, la CHPF regroupe les moyens humains et matériels étatiques et polynésiens.

Il faut pourtant noter qu'elle est sous la direction fonctionnelle de la direction de l'équipement de Polynésie, et que la programmation de ses travaux est établie par une commission hydrographique présidée par la Polynésie et non coprésidée.

Cette structure peut représenter un enjeu politique important en terme d'affichage : elle pourrait symboliser la prise effective d'une compétence par la Polynésie.

Son avenir mixte n'est donc pas certain.

Deux scénarios sont envisageables à moyen terme en Polynésie :

- Maintien d'une structure mixte pérennisant la situation actuelle ;
- Prise en charge intégrale par la Polynésie de l'hydrographie (en principe, de ses seules eaux intérieures), la CHPF deviendrait alors polynésienne à 100 %. Dans cette hypothèse, la place du SHOM devra être redéfinie, elle devrait permettre de réaliser les levés des eaux hors mer intérieure, ainsi que les levés militaires.

Quoi qu'il en soit, la structure mixte actuelle devrait perdurer un certain temps (5 à 10 ans) étant donné le manque d'hydrographes expérimentés en Polynésie : celle-ci ne devrait pas envoyer d'hydrographes en formation avant le BS 2007 au plus tôt (les hydrographes précédemment formés à Brest n'ont pas pour l'instant été affectés à la cellule, ni employés en hydrographie hormis quelques concours à la MOP).

Nouvelle-Calédonie

La loi organique stipule que la sécurité de la circulation maritime fait partie des compétences transférables.

Cette compétence s'étendrait alors à la mer territoriale, c'est-à-dire à l'immense majorité des zones intéressant la sécurité de la navigation en Nouvelle-Calédonie (la mer territoriale est en effet en règle générale comptée à partir du récif barrière, qui est lui-même éloigné de la côte).

Le processus de transfert de compétence n'est pas encore concrétisé, même si la Nouvelle-Calédonie a pris les devants en coopérant au fonctionnement de la BHNC et en envoyant des hydrographes en formation (la première stagiaire est actuellement en cours de formation à l'EPSHOM).

Comme pour toute compétence transférable, les contraintes calendaires sont les suivantes : les modalités du transfert de la compétence doivent être définies par une « loi du pays » dans les 6 mois suivant l'élection du congrès (l'assemblée néo-calédonienne) au plus tard en 2009.

Le transfert aurait pu en théorie se faire dès 2004, mais n'a pas eu lieu, la prochaine échéance (et en principe la dernière, le congrès étant renouvelé tous les 5 ans) est donc 2009. Cela ne signifie pas que le transfert sera effectif en 2009, mais son organisation devrait en principe être définie à cette échéance.

Comme en Polynésie, cette possibilité de transfert revêt des enjeux politiques et ses modalités ne sont pour l'instant pas précisées. Le gouvernement de Nouvelle-Calédonie utilise actuellement le terme de « préparation du transfert de compétence », et évoque l'intérêt à long terme de disposer localement de compétences en hydrographie.

A court terme, la BHNC intégrera un effectif croissant d'hydrographes néo-calédoniens (une mi-2007, un mi-2008, et peut-être deux mi-2009).

Comme en Polynésie, une passation de compétence complète ne peut guère s'envisager avant que ces hydrographes aient acquis l'expérience nécessaire, soit 5 à 10 ans à compter de 2007.

Entre-temps, le référendum d'autodétermination aura eu lieu et nul ne peut prédire l'évolution de la Nouvelle-Calédonie à cette échéance.

Annexe 1

Objet : méthodes, innovation

Date	N°	Destinataire	Timbre	Type	Objet
16/12/2004	319	EPSHOM	MOP/NP	Fiche	Evaluation du logiciel marmonde (version décembre 2004)
18/05/2006	124	DIRSHOM	MOP/NP	Fiche	Appartenance à un « polygone » sur l'ellipsoïde
18/05/2006	125	COMSUP NOUMEA	MOP/DR	Compte rendu	Mission REA à bord du HMNZS <i>Resolution</i>
10/07/2006	166	EPSHOM/CIS	MOP/NP	Fiche	Essais du DGPS via GPRS
11/07/2006	169	EPSHOM/CIS	MOP/NP	Fiche	Retour d'expérience de l'acquisition numérique du sonar latéral
03/08/2006	200	DIRSHOM	MOP/NP	Fiche	Analyse de la connaissance hydrographique en Nouvelle-Calédonie

Annexe 2

Objet : levés rédigés

Objet	Référence et date
RP 2003	
Reconnaissance des approches de points de débarquement extérieurs aux atolls de Takume, Napuka, Pukapuka et Tepoto Nord (archipel des Tuamotu)	N° 266 MOP/NP du 26/11/03
Levé bathymétrique d'une voie recommandée entre la passe de Poum et le du 26/11/03 mouillage Sud de l'île Mouac	N° 268 MOP/NP
RP 2004	
Levé Baron	N° 15 MOP/NP du 28/01/04
Levé bathymétrique de l'accès à la plage de Douéoulou (Lifou)	N° 109 MOP/NP du 19/05/04
Travaux hydrographiques sur la côte Nord de Ua Pou (archipel des Marquises)	N° 137 MOP/NP du 29/06/04
Levé bathymétrique d'une base de pêche à Tadine (Maré)	N° 155 MOP/NP du 15/07/04
Travaux de spatiopréparation à Wallis	N° 185 MOP/NP du 16/08/04
Levé de plage sur la côte Nord de Ua Pou (archipel des Marquises)	N° 189 MOP/DR du 23/08/04
Levé bathymétrique de deux voies recommandées entre Thio et Nakety	N° 241 MOP/NP du 11/10/04
Travaux hydrographiques en baie de Kuto (île des Pins)	N° 259 MOP/NP du 20/10/04
Rattachement et spatiopréparation des atolls Hereheretue, Tématangi, Turéia et Vanavana (archipel des Tuamotu)	N° 212 MOP/NP du 15/11/04
Levé de la passe du Duroc et de la baie de Chasseloup à Voh (Province Nord) pour l'accès à un futur port minéralier (projet Koniambo)	N° 308 MOP/NP du 06/12/04
RP 2005	
Travaux de spatiopréparation au plateau des Bellona	N° 50 MOP/NP 09/02/05
Levée bathymétrique de contrôle de l'accès de la baie de Hienghène aux paquebots de la société P&O	N° 069 MOP/NP du 09/03/05
Rattachement et spatiopréparation des îles Motu Iti , Mohotani, Fatu Huku et géodésie à Tahuata (archipel des Marquises)	N° 74 MOP/NP du 15/03/05
Spatiopréparation de l'atoll de Hereheretue (archipel des Tuamotu)	N° 109 MOP/NP du 20/04/05
Travaux hydrographiques sur la côte Ouest de Tahuata (archipel des Marquises)	N° 114 MOP/NP du 28/04/05
Levé bathymétrique à Chépénéhé en vue de la création d'une base de pêche	N° 115 MOP/NP du 29/04/05
Spatiopréparation à Nuku Hiva (archipel des Marquises)	N° 123 MOP/NP du 04/05/05
Levé bathymétrique à Mouly (Ouvéa) pour l'accès de paquebots aux différents points de débarquement des croisiéristes	N° 184 MOP/NP du 19/07/05
Spatiopréparation à Hiva Oa (archipel des Marquises)	N° 190 MOP/NP du 22/07/05
Levé bathymétrique à Hwaadrila (Ouvéa) en vue création base de pêche	N° 193 MOP/NP du 27/07/05
Travaux hydrographiques dans l'île de Bora Bora (archipel de la Société)	N° 256 MOP/NP du 16/09/05
Levé de plage au Nord de la Baie de Faanui, Bora Bora (archipel de la Société)	N° 258 MOP/NP du 16/09/05
Levé de plage et de quais à Faré, Huahiné (archipel de la Société)	N° 271 MOP/DR du 28/09/05
Levé bathymétrique de l'accès à la plage de Méomo (Baie de Lebris)	N° 353 MOP/DR du 06/12/05
RP 2006	
Levé bathymétrique d'une voie recommandée entre la passe de Poum et le mouillage Nord de l'île Mouac	N° 10 MOP/NP du 06/02/06
Levé de plageage à Wallis	N° 29 MOP/DR du 20/02/06
Levé hydrographique à Raiatea et Tahaa (archipel de la Société)	N° 140 MOP/NP du 09/06/06
Levé de plages, d'embectages et de quais à Raiatea et Tahaa (archipel de la Société)	N° 141 MOP/DR du 09/06/06
Levé de plage à Mururoa « quais et rampe »	N° 160 MOP/DR du 26/06/06
Levé hydrographique dans le port militaire de Papeete	N° 162 MOP/DR du 30/06/06
Spatiopréparation Katiu, Apataki, Marokau, Tuanake et Tepoto sud	N° 163 MOP/NP du 05/07/06
Levés de plages à Rapa et Raivavae	N° 196 MOP/DR du 02/08/06
Travaux à Tubuai (note express)	N° 197 MOP/DR du 02/08/06

Annexe 3

Objet : planches photographiques

Moyens nautiques



Le *Louis Hénin* en sondage (Thio - Nakety)



Hissage du *Chambeyron* à bord du *Louis Hénin*

Moyens nautiques



Levé en coopération avec la DITTT à Kuto



L'Eugène Morignat (Poum)

Moyens nautiques



Le *Chambeyron* en sondage (Port-Boisé)



La vedette *Hunter* (Papeete)

Véhicules



De l'utilité d'un 4x4 en Nouvelle-Calédonie



La dernière contribution de la Nouvelle-Calédonie (décembre 2005)

Le « REA »



Levé de plage en coralline (Meomo)



Un SDHM avant la lettre (Bourake)

Concours



L'hélicoptère, un concours précieux



Concours de la Marine (P400 *La Moqueuse*, aux Bellona)

Techniques



Le marégraphe côtier numérique de Nouméa



Trajectographie à Wallis

Autorités

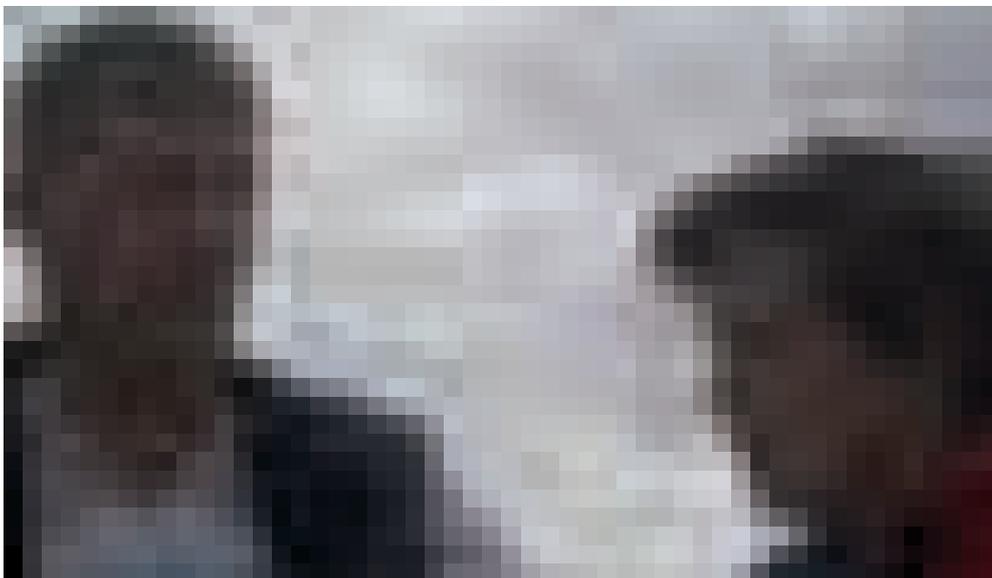


La commission hydrographique de Nouvelle-Calédonie



Visite du COMSUP

Communication



Journaliste à bord du *Louis Hénin* (Thio)



Journée des forces armées de Nouvelle-Calédonie

Cohésion



Ascension du Mont Humboldt (1618 m)



Commémoration au sommet

Cohésion



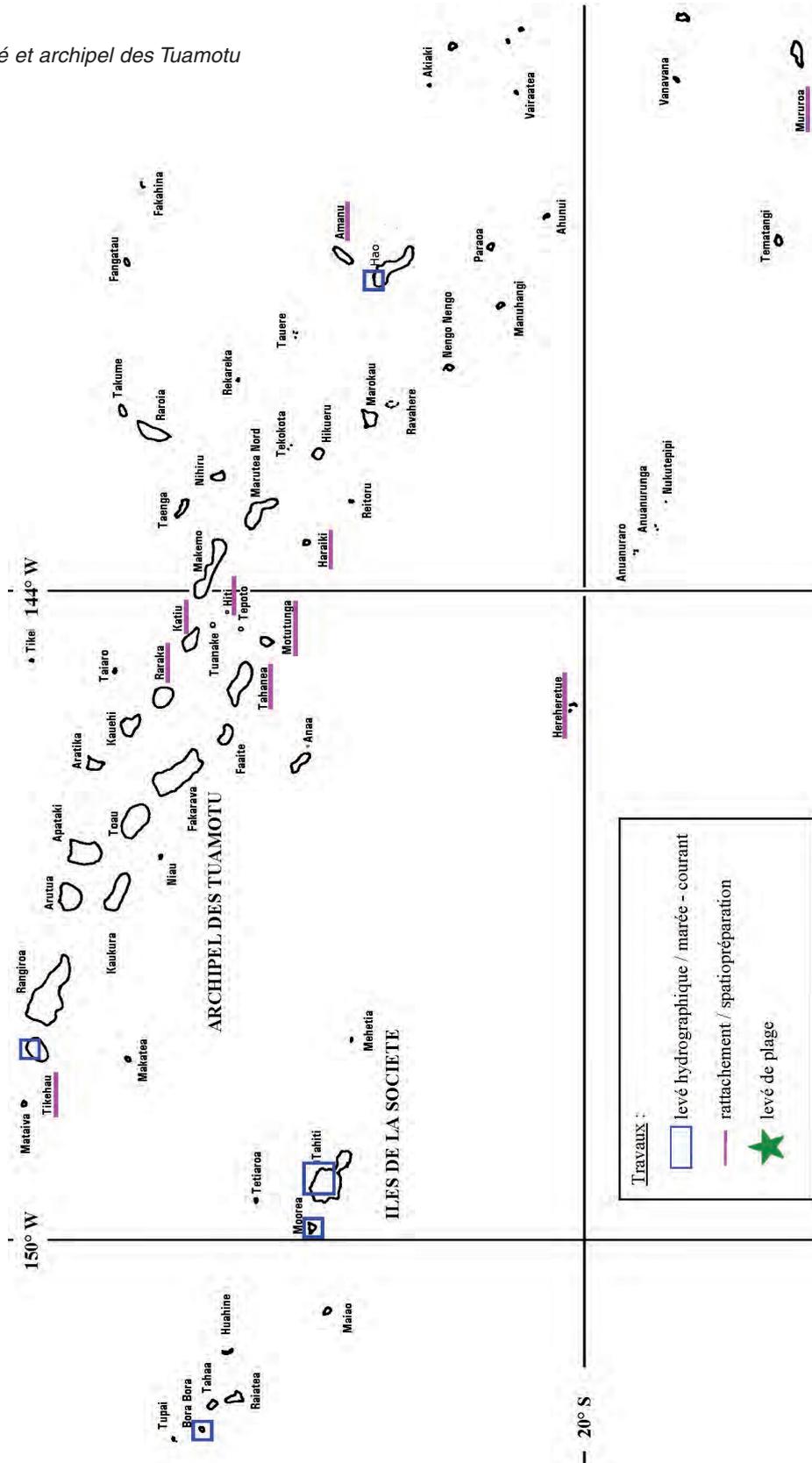
Repas de fin d'année à la BHNC (le service des phares et balises est invité)



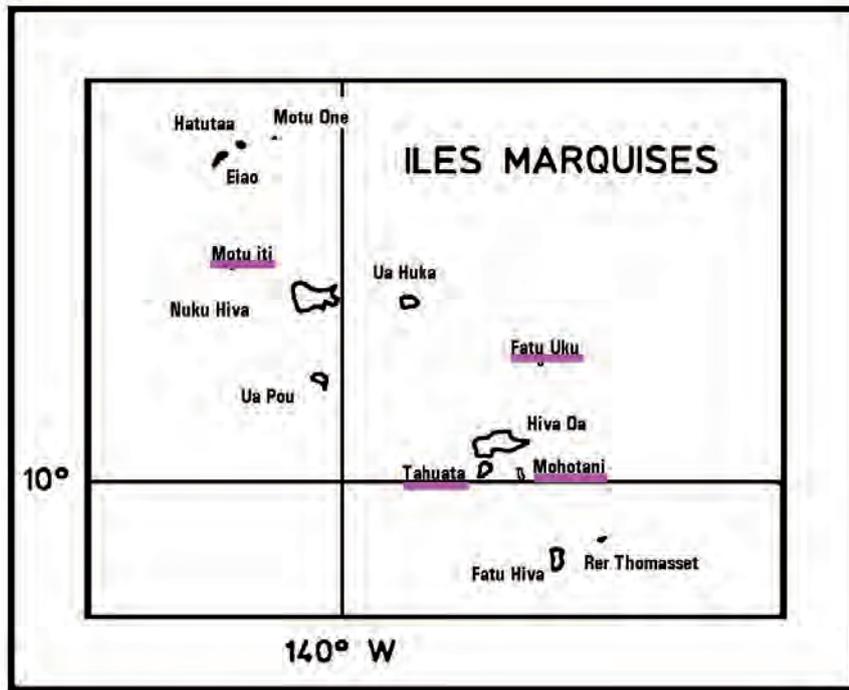
Sortie de cohésion de la BHPF

Planche 2 : travaux en Polynésie française

1 - Iles de la Société et archipel des Tuamotu



2 - Iles Australes et Marquises

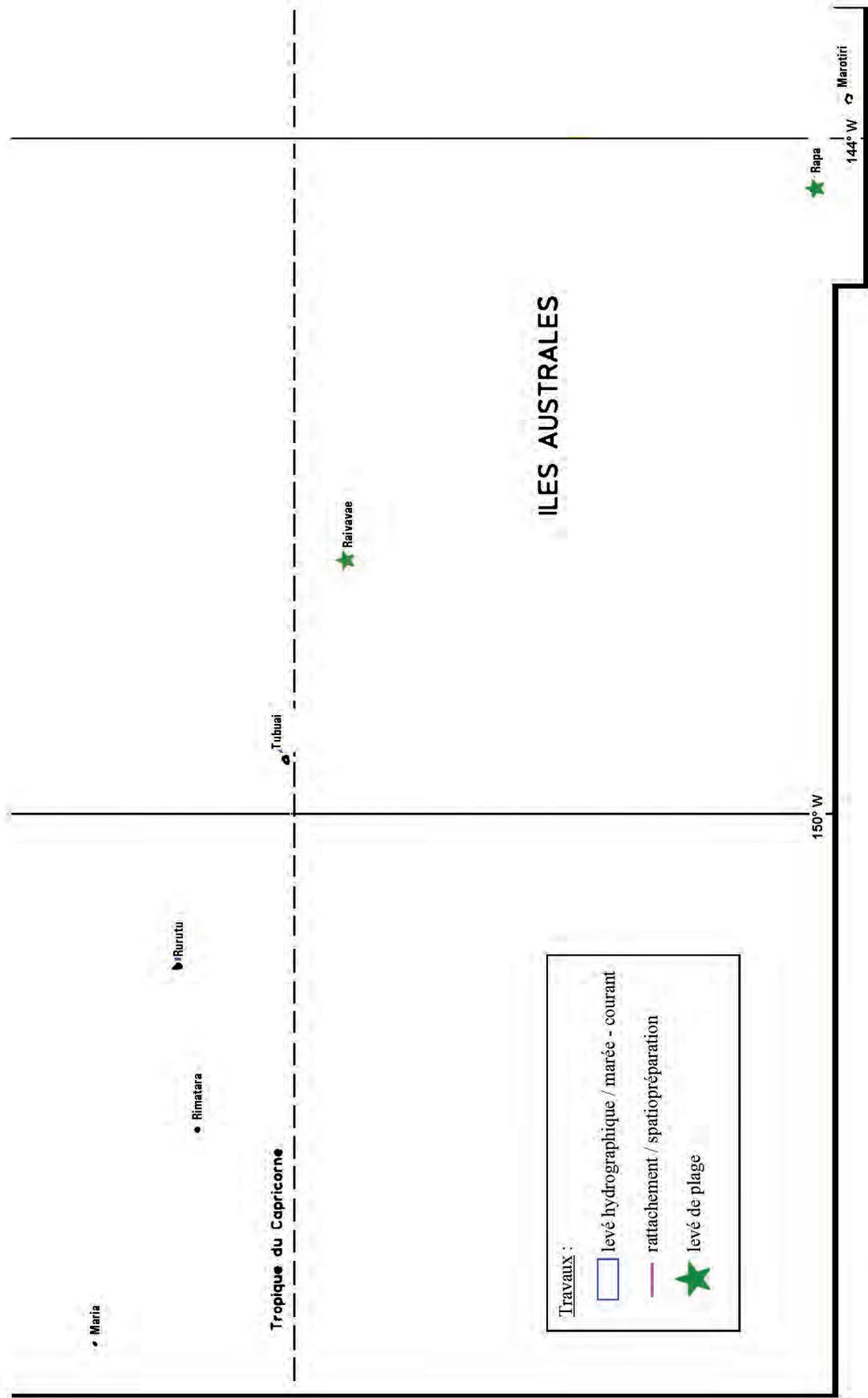


Travaux :

 levé hydrographique / marée - courant

 rattachement / spatiopréparation

 levé de plage



SHOM : UN NOUVEAU STATUT POUR DE NOUVELLES AMBITIONS

par Michel LE GOUIC, ingénieur général de l'armement

RÉSUMÉ

Le développement progressif de l'océanographie militaire avait été consacré en 1971 par le changement d'appellation du service central hydrographique qui est alors devenu service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM). L'intégration dans un organisme unique d'activités présentant une grande synergie naturelle (connaissances scientifiques, méthodes et moyens de recueil et d'exploitation de données, ...) offrait en effet l'avantage d'une grande souplesse d'emploi de moyens et de personnel relativement polyvalents. Elle permettait ainsi de faire face de manière économique à des besoins considérables et critiques pour le succès des opérations militaires.

Depuis 1971 on a observé une montée en puissance des besoins en connaissance de l'environnement physique maritime, côtier et océanique, pour la navigation maritime et pour la préparation et la conduite des opérations. Cette situation s'est accentuée avec une explosion des besoins de la société en général, motivée par une gestion responsable de la planète Mer et désireuse de profiter rapidement de l'apport des technologies nouvelles.

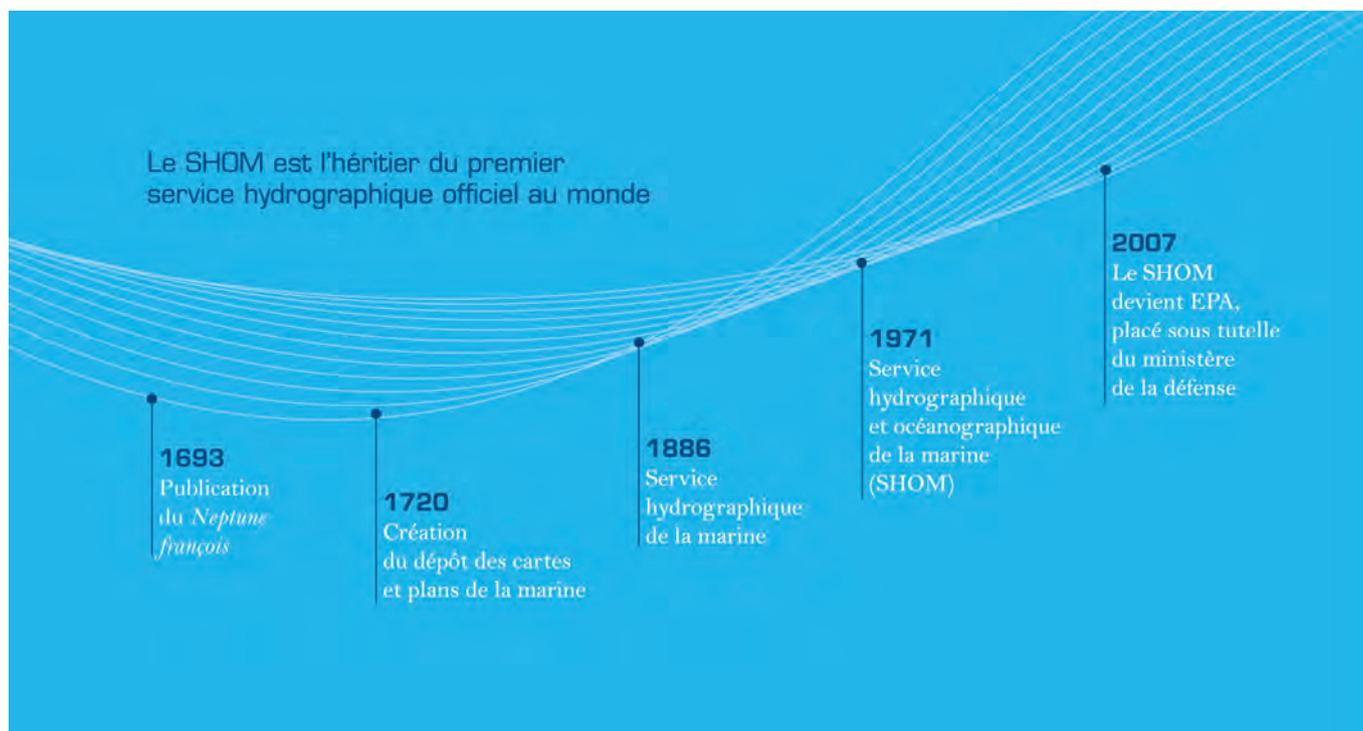
Le SHOM se situe à la convergence des besoins de connaissance physique de l'océan dans les zones les plus sensibles en regard des intérêts nationaux, aussi bien pour la sécurité du transport maritime, la maîtrise de l'environnement physique, les opérations militaires et l'organisation de la protection des zones sous juridiction française. A l'aube du XXI^e siècle, plusieurs facteurs ont conduit à reconsidérer son rôle et les conditions de l'exercice de ses responsabilités. Cette réflexion a conduit non seulement à élargir ses attributions, mais à le doter d'un nouveau statut.

ABSTRACT

The increasing interest for military use of oceanography was emphasized in 1971 by the changing of name of the French Hydrographic Service which became the "Navy Hydrographic and Oceanographic Service". By running within a unique organism activities in strong natural synergy (scientific expertise, data acquisition & processing methods and tools, databases...), it was then possible to bring flexibility in the use of rather polyvalent human resources and means. This also allowed addressing considerable and critical military needs in an economic way.

Since 1971 the need for knowledge of the maritime physical environment in coastal or deep water, as well as for navigation or military operations, has steadily increased. This evolution has become even more acute with the increasing expectations of the society for a sustainable management of our planet "Ocean" and for a quick implementation of new technologies.

SHOM position is at the convergence of the needs for a physical knowledge of the Ocean, in the most sensitive areas with regard to national interests, safety of maritime navigation, military operations and environmental protection of the French waters. At the dawn of the 21st century this led to reconsider SHOM role and the way it can put into force its responsibilities. In 2007, by a new constitutive decree SHOM was given wider attributions and a new statute.



LE CONSTAT DU COMITÉ INTERMINISTÉRIEL DE LA MER EN 2003

Prenant acte d'une demande croissante de maîtrise de l'environnement maritime pour des finalités autres que nautiques ou militaires (protection de l'environnement, définition des politiques publiques, action de l'Etat en mer, maîtrise des ressources, ...), le comité interministériel de la mer (CIMer) du 29 avril 2003 avait adopté la décision suivante :

« Les missions du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM), telles que définies par le décret 71-396 du 25 mai 1971 seront modifiées pour lui permettre de participer à la satisfaction, en matière d'information géographique, des besoins civils dans les zones sous juridiction française, et particulièrement des besoins liés à la gestion des zones côtières. [...] Il convient donc de lancer une étude pour examiner la possibilité d'étendre et de diversifier ses ressources avec ou sans changement de son statut. En tout état de cause, il conviendra de favoriser la synergie des activités civiles et militaires, tout en continuant à satisfaire les besoins militaires »

Le décret 71-396 du 25 mai 1971 avait fixé les attributions du service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM), en confiant à ce service de la marine nationale deux missions :

- service public national chargé d'exercer les attributions de l'État en matière d'hydrographie nationale en assurant le recueil, l'archivage et la diffusion des informations officielles nécessaires à la navigation : cette mission correspond désormais aux obligations nationales souscrites par l'Etat du fait de la révision de la convention internationale sur la sauvegarde de la vie humaine en mer (convention SOLAS) : ce rôle est en pratique étendu, sous l'égide de l'organisation hydrographique internationale ou à travers des arrangements avec les Etats concernés, à divers pays francophones qui n'ont pas encore développé l'ensemble des capacités hydrographiques nécessaires ;
- service de soutien des forces et de la délégation générale pour l'armement (DGA) en matière de données d'environnement physique marin, chargé d'assurer la satisfaction des besoins d'expertise, d'évaluation des capacités futures et de soutien opérationnel de la défense.

Pour assurer ses deux missions le SHOM recueille des données et entretient des expertises et des connaissances qui peuvent être mises à la disposition d'autres ministères ou partenaires. Le décret de 1971 n'avait pas prévu explicitement une telle attribution. Il ne donnait surtout aucune légitimité au SHOM pour affecter des moyens à la satisfaction de ces nouveaux besoins et rendait de fait l'organisation de ses activités inappropriée en regard des dispositifs réglementaires européens ou nationaux parus depuis cette date. L'intention initiale de la décision susmentionnée du CIMer2003 est bien de corriger cette insuffisance législative en modifiant les attributions du SHOM afin de lui permettre d'assumer cette mission nouvelle.

LA MISSION D'ÉTUDE STRATÉGIQUE CONDUITE PAR M. LEBEAU EN 2005

En application de ces recommandations, le ministre de la défense confia en janvier 2005 à Monsieur André Lebeau, ancien directeur général de Météo-France et ancien prési-

dent du centre national d'études spatiales (CNES), une mission d'étude afin de définir les actions à engager pour mettre en œuvre les conclusions du CIMer. La lettre de mission précisait que l'objectif était de « *décrire les axes d'étude nécessaires pour répondre aux demandes du CIMer et conserver la compétence sur le long terme dans le domaine HOM* » et précisait parmi les éléments de « *politique générale* » que « *le statut du SHOM devra rester compatible avec le statut militaire d'une grande partie de son personnel et permettre à celui-ci de participer à des opérations réelles* ».

Une large consultation a été lancée qui, outre les agents du SHOM, a impliqué notamment ses partenaires naturels (Météo-France, IGN, Ifremer, CLS), ses tutelles (marine nationale, y compris le préfet maritime de Brest pour son rôle dans l'action de l'Etat en mer, les grands clients que sont les forces sous-marines et la force d'action navale, et la DGA), le secrétariat général pour l'administration du ministère de la défense et le secrétariat général de la mer dépendant du Premier ministre. Après avoir analysé une abondante documentation, comparé les situations à l'étranger et dressé le bilan des rapports des diverses inspections et missions de contrôle, qui invariablement depuis 1964, soulignaient les particularités du Service et ses difficultés à obtenir une autonomie suffisante, M Lebeau rendait son rapport le 30 septembre 2005, et préconisait :

- l'instauration d'une gouvernance interministérielle afin de tenir compte de la diversité des besoins que pouvaient satisfaire les produits du SHOM et les compétences spécifiques de son personnel ;
- l'ouverture à des ressources autres que celles de la défense, et notamment celles provenant des ministères bénéficiaires de l'action du SHOM, des collectivités territoriales et de l'Europe ;
- l'ouverture à tous les usagers, publics et privés, de l'accès à l'ensemble des informations de base fournies par l'entité chargée du service public hydro-océanographique, et nécessaires à l'exercice de leurs activités. En application des directives nationales et communautaires, cette information devait rester gratuite, aux coûts marginaux de diffusion près : en conséquence, les ressources commerciales de l'entité chargée du service public hydro-océanographique ne pouvaient que rester marginales.
- l'accès à une personnalité juridique propre, permettant une contractualisation plus effective notamment avec la délégation générale pour l'armement, mais aussi avec les divers départements ministériels et collectivités territoriales concernées par les activités du SHOM.

En conclusion de son étude, M Lebeau suggérait d'adopter un statut d'établissement public administratif (EPA). Ce statut devait en effet donner au service une personnalité juridique distincte de celle de l'Etat, facilitant le développement de partenariats avec d'autres acteurs publics du domaine maritime et l'accès aux financements publics extra budgétaires, tout en affichant clairement son appartenance au secteur public. Le conseil d'administration de l'établissement serait en outre le lieu d'exercice de la gouvernance interministérielle recherchée (élaboration du contrat d'objectifs et de moyens, vote du budget, approbation des comptes). Le rapport expliquait aussi les autres pistes suivies et écartées : autre régime d'établissement public (par exemple EPIC¹), rapprochement voire fusion avec un autre établissement déjà existant.

LA DÉCISION DU MINISTRE DE LA DÉFENSE EN 2006

Suite à cette mission d'étude le directeur du SHOM a été appelé par le ministre de la défense à se prononcer sur l'évolution du statut du SHOM, après concertation avec le personnel du SHOM d'une part et ses principaux partenaires nationaux d'autre part. Conformément aux directives, cette concertation a été menée en étroite liaison avec l'état-major de la marine, en y associant l'état-major des armées, la délégation générale pour l'armement et le secrétariat général pour l'administration du ministère de la défense.

Elle s'est appuyée sur une équipe de projet interne au SHOM réunissant autour du directeur ses principaux collaborateurs.

La concertation avec le personnel a fait l'objet d'une grande attention. L'ensemble des documents de la mission d'étude a été mis en consultation directe sur le réseau Intranet du SHOM, accompagné d'un message du directeur du SHOM, expliquant à chacun les enjeux et les modalités de la démarche. Un forum d'échange a été ouvert sur Intranet pour recueillir les observations, suggestions et questions du personnel et plusieurs réunions d'information et de travail avec les représentants du personnel civil et militaire ont été organisées.

A l'inquiétude résultant en grande partie de l'information nécessairement limitée pendant la mission d'étude, a succédé une volonté de participer de manière constructive aux évolutions envisagées.

Par ailleurs, des entretiens particuliers ont été tenus avec les principaux interlocuteurs civils du SHOM, notamment le secrétariat général de la mer, la délégation interministérielle à l'aménagement et à la compétitivité des territoires, la direction des affaires maritimes du ministère chargé des transports, Météo-France, l'institut géographique national (IGN) et l'institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer).

Cette concertation a permis le 15 janvier 2006 de conforter les orientations dégagées lors de la mission d'étude, en particulier de confirmer que le statut d'établissement public à caractère administratif constituait le cadre le plus favorable à l'accès à des financements interministériels et au développement indispensable des partenariats nationaux et européens. L'analyse recommandait par ailleurs l'élaboration d'un contrat d'objectifs et de moyens associés, porteur de nouvelles ambitions, permettant d'assurer une lisibilité forte au caractère de service public attaché aux missions élargies du SHOM et préservant le statut du personnel, notamment militaire.

L'importance de maintenir un lien très étroit avec la marine était soulignée parce que les besoins de la marine sont englobants et structurants par rapport à ceux des autres composantes de la défense, parce que le SHOM continuera d'en dépendre directement pour la mise en œuvre des moyens navals lourds nécessaires à l'exercice de ses missions et parce que le futur centre interarmées de soutien météo-océanographique des forces (CISMF) s'appuiera sur le SHOM pour la cohérence globale du soutien hydro-océano-météorologique des forces.

La transformation du SHOM en établissement public administratif était décidée le 4 avril 2006 par le ministre de la défense.

LA PRÉPARATION DU CHANGEMENT DE STATUT EN 2006 ET 2007

Il faudra encore une année de travail pour que le changement de statut soit rendu effectif par la publication du décret 2007-800 du 11 mai 2007, paru dans le journal officiel du 12 mai 2007, et souvent consulté comme texte faisant référence dans la publication de l'organisation hydrographique internationale sur les règlements nationaux.

La rédaction du décret lui-même a nécessité une large concertation interne à la défense avec des arbitrages périodiquement arrêtés par le cabinet du ministre, des contacts réguliers avec les ministères concernés par l'action du SHOM et notamment ceux signataires du décret, une revue par le conseil d'Etat. La mise en application a demandé la préparation (nouveau texte, texte amendé ou supprimé) de près de 150 textes réglementaires dont 7 décrets et 33 arrêtés.

La modification du statut a nécessité de revoir l'organisation du SHOM dont la structure précédente séparait nettement les fonctions d'administration centrale exercée depuis une direction implantée à Paris, et les organes d'exécution implantés en grande partie à Brest. Cette séparation n'avait plus lieu d'être et seule une antenne parisienne de la direction générale, chargée des relations extérieures du SHOM était conservée, hébergée par l'institut géographique national à Saint-Mandé.

Une nouvelle organisation interne a été mise en place où l'essentiel des ressources du SHOM est affecté aux organes de production que sont les groupes hydro-océanographiques (GHO) et la direction des opérations (DO) dont la principale mission est fournir aux clients et usagers du SHOM les produits et services qu'ils recherchent.

Durant cette année une agence comptable a été créée, les nouveaux outils adaptés à la comptabilité des EPA ont été acquis et paramétrés et un premier budget adopté lors de la première séance inaugurale du conseil d'administration le 23 juillet 2007 tenue au siège du SHOM à Brest.

Une attention particulière a été portée à l'information du personnel et à son association dans la conduite du changement. Deux réunions générales ont été animées par la direction des ressources humaines du ministère de la défense et un dossier complet d'information sur les statuts a été diffusé à chaque agent du SHOM.

Les instances nouvelles que sont le comité technique paritaire central (CTPC) et le comité d'hygiène et de sécurité (CHS) ont été mises en place et les représentants du personnel ont pu siéger lors de la deuxième réunion du conseil d'administration.

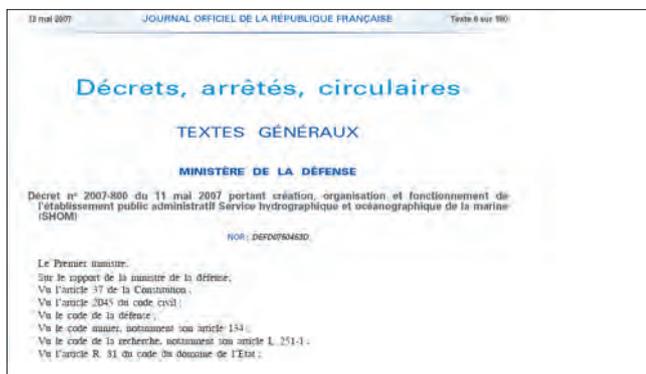
La question d'un éventuel changement de nom du service a été débattue sur un forum interne particulièrement créatif, qui a conclu in fine que le SHOM, Service hydrographique et océanographique de la marine, avait une notoriété appréciable et qu'il fallait conserver cette appellation. Une large campagne de communication institutionnelle a accompagné le processus d'évolution, tant au sein de la marine nationale, qu'auprès des partenaires et usagers des documents, produits et services du SHOM.

LE DÉCRET 2007-800 DU 11 MAI 2007

Le décret 2007-800 érige le SHOM en établissement public de l'Etat à caractère administratif, doté de la personnalité morale et de l'autonomie financière et placé sous la tutelle du ministre de la défense. Il reformule les missions du SHOM, incluant le soutien aux politiques publiques. Il prévoit que l'établissement est administré par un conseil d'administration et dirigé par un directeur général. Le conseil d'administration est composé d'un président, le chef d'état-major de la marine, et de dix neuf membres répartis comme suit :

- onze représentants de l'administration :
 - cinq représentants du ministre chargé de la défense (chef d'état-major des armées, délégué général de l'armement, secrétaire général de l'administration, le commandant de la force océanographique stratégique et l'amiral commandant les opérations aéronavales)
 - un représentant du ministre chargé du budget,
 - un représentant du ministre chargé de l'industrie,
 - un représentant du ministre chargé des transports,
 - un représentant du ministre chargé de l'environnement et du développement durable,
 - un représentant du ministre chargé de l'outre-mer,
 - le secrétaire général de la mer ;
- quatre personnalités nommées par le ministre de la défense ;
- quatre représentants du personnel (trois civils et un militaire).

Afin de limiter la taille du conseil d'administration, le secrétaire général de la mer porte les intérêts des ministères qui ne sont pas représentés directement (affaires étrangères, agriculture et pêche, aménagement du territoire, recherche, etc.).



Les missions du SHOM sont fixées par l'article 4 du décret qui stipule :

Le SHOM a pour mission de connaître et de décrire l'environnement physique marin dans ses relations avec l'atmosphère, avec les fonds marins et les zones littorales et d'en prévoir l'évolution. Il assure la diffusion des informations correspondantes.

1° Il exerce les attributions de l'Etat en matière d'hydrographie nationale dans les zones sous la juridiction nationale et dans les zones où la France exerce des responsabilités du fait d'engagements internationaux particuliers, en assurant le recueil, l'archivage et la diffusion des informations officielles nécessaires à la navigation.

2° Il est responsable, dans ses domaines de compétence, de la satisfaction des besoins d'expertise, d'évaluation des capacités futures et de soutien opérationnel de la défense, Dans ces mêmes domaines, il a vocation à représenter le ministère de la défense dans ses relations avec les organismes de recherche.

Il assure l'approvisionnement et la maintenance du matériel du domaine hydro-océanographique des armées dont la liste est fixée par arrêté du ministre de la défense.

3° Il participe à la satisfaction des besoins en matière d'action de l'Etat en mer et sur le littoral, dans toutes les zones sous juridiction nationale et dans les zones où la France exerce des responsabilités du fait d'engagements particuliers, notamment par les actions suivantes :

- la fourniture aux services de l'Etat de l'expertise et des informations relatives à l'environnement physique marin ;
- le concours aux collectivités territoriales pour la collecte, la gestion ou la diffusion des informations marines ou littorales relatives à l'environnement physique marin ;
- la gestion de bases nationales d'informations sur l'environnement physique marin ;
- la mise à la disposition du public des produits non confidentiels qu'il élabore.

L'article 6 confie au SHOM la représentation de la France auprès de l'Organisation hydrographique internationale.

Le décret prévoit le maintien des instances de concertation actuelles que sont le comité directeur et comité scientifique de l'océanographie militaire, comité consultatif des utilisateurs des documents, levés et prestations du SHOM. Ces instances sont chargées désormais d'assister le conseil d'administration et le directeur général.

CONCLUSION

Cette refondation du SHOM a eu pour objectifs de mettre en cohérence sa gouvernance, son financement et les bénéficiaires de ses activités, tout en préservant les facteurs indéniables d'économie de l'organisation précédente, afin de conserver une capacité optimisée pour répondre aux besoins de la chaîne politico-militaire (du niveau politique au niveau tactique), de continuer à prendre en compte les contraintes inhérentes à la mission de soutien aux forces (discrétion, permanence / disponibilité, adaptabilité), de continuer à assurer une intégration verticale efficace de l'expertise (allant de la recherche et développement à la production de documents et services opérationnels et à la formation des utilisateurs), en permettant l'usage dual des capacités et prestations du SHOM et en maintenant complémentarité et synergie avec les autres acteurs français de la géographie, de la météorologie et de l'océanographie ainsi qu'avec les homologues européens du SHOM.

Deux principes de base ont été retenus pour cette refondation :

- la mise en place d'une gouvernance interministérielle sous tutelle défense,
- la confirmation d'une logique de service public, financé sur fonds essentiellement publics (budgétaires, collectivités territoriales, Union européenne), en amont du secteur concurrentiel.

Ces deux principes se déclinent en érigeant le SHOM en établissement public national à caractère administratif sous tutelle défense, sur la base d'un texte constitutif et de dispositions d'application veillant à préserver les avantages et les facteurs d'économie de l'organisation en place, notamment en donnant une dimension interarmées au soutien HOM assuré par le SHOM. Le lien étroit avec la marine est maintenu d'une part en donnant à la marine une place privilégiée dans les instances de direction de l'établissement et d'autre part en conservant la mise en œuvre par la marine des moyens à la mer. Un contrat pluriannuel d'objectifs et de moyens fixera le rythme de consolidation des missions traditionnelles et de montée en puissance du soutien aux politiques publiques de la mer et du littoral.

Vision stratégique du SHOM

Mission

Garantir la qualité et la disponibilité de l'information décrivant l'environnement physique maritime, côtier et océanique, en coordonnant son recueil, son archivage et sa diffusion, pour satisfaire au moindre coût les besoins publics, militaires et civils.

Vision

Consolider les tâches prioritaires au service de la défense et de la sécurité de la navigation maritime et développer une nouvelle politique de services en soutien des politiques publiques maritimes et du littoral.

Ces deux objectifs seront atteints en développant les partenariats, la coopération européenne et internationale, en tirant le meilleur parti des avancées technologiques et en optimisant la répartition des moyens pour améliorer la connaissance du milieu et de son évolution, et valoriser cette connaissance en répondant à de multiples besoins.

(1) Etablissement public à caractère industriel et commercial.

Imprimerie du Service hydrographique
et océanographique de la marine
13 rue du Chatellier
CS 92803
29228 BREST CEDEX 2
Février 2009

Dépôt légal premier trimestre 2009
Numéro d'éditeur : 2751

Sommaire

Première partie

Apport des télémètres radar en hydrographie et évaluation de leurs performances,
par l'IETA R. LEROY

Le système de management de la qualité du SHOM,
par l'ICETA H. DOLOU, B. BONDUELLE

Recommandation nationale : levés au laser bathymétrique ; le projet Litto3D®,
par l'IPETA C. LE ROUX

Epuration surfacique adaptative des données bathymétriques multifaisceaux, *par N. DEBEZE*

De la classification des sédiments à la cartographie de la nature des fonds marins,
par T. GARLAN

Deuxième partie

Mission océanographique du Pacifique - (août 2003 - août 2006),
par l'ICA J. MEYRAT

SHOM : un nouveau statut pour de nouvelles ambitions,
par l'IGA M. LE GOUIC

ANNALES HYDROGRAPHIQUES 774



ISBN 978-2-11-097231-6