

Annales Hydrographiques

6^e Série - Vol. 4

N° 773



Service
Hydrographique
et Océanographique
de la Marine



2006

ANNALES HYDROGRAPHIQUES

TABLE DES MATIÈRES

Pages

Première partie

Biographie de l'IGA Marc EYRIÈS (1919 - 2005), <i>par l'IGA Y. DESNOËS</i>	1-1
Situation de l'hydrographie en Afrique de l'Ouest, <i>par l'IGA M. LE GOUIC</i>	2-1
Références de hauteur en hydrographie, <i>par B. SIMON</i>	3-1
Modélisation côtière appliquée aux prédictions de marée pour la réduction des sondages hydrographiques, <i>par L. PINEAU-GUILLOU</i>	4-1
Étude et modélisation de la dynamique des dunes sous-marines, <i>par T. GARLAN</i>	5-1

Deuxième partie

Mission océanographique de l'Atlantique – (septembre 1996 – septembre 1998), <i>par A. FOURGASSIÉ</i> ..	6-1
--	-----

PREMIÈRE PARTIE

BIOGRAPHIE DE L'INGÉNIEUR GÉNÉRAL MARC EYRIÈS (1919 – 2005)

Communication de l'IGA Yves Desnoës, 16 septembre 2005

L'ingénieur général de l'armement (hydrographe) Marc Eyriès s'est éteint le 9 août dernier. Il a laissé à tous ceux qui ont servi sous ses ordres le souvenir d'un homme rigoureux et exigeant, mais aussi profondément humain et d'une grande gentillesse naturelle.

Marc Eyriès, né en 1919, est entré dans la marine nationale en 1939. Dès sa sortie de l'école navale il fut affecté outre-mer et a servi en temps de guerre en Atlantique, Méditerranée et Manche, jusqu'à la fin des hostilités. Il a participé ensuite aux opérations de déminage et est entré au service hydrographique de la marine en 1949. Depuis cette époque, son activité a été consacrée exclusivement à l'hydrographie et à l'océanographie nationales et internationales. Il a participé à des campagnes hydrographiques sur les côtes de France et du Maroc en 1950-1951. Il a dirigé une campagne sur les côtes de Madagascar en 1951-1952 puis sur les côtes de France en 1961-1962.

Spécialisé dans les études de dynamique de la mer, concernant plus particulièrement la marée, il a enseigné la mécanique de la mer de 1954 à 1971 à la faculté des sciences de Paris et à l'école du service hydrographique. Grand scientifique autant que grand ingénieur, ce fut un précurseur de la dynamique à l'échelle des océans et la position en pointe de la France dans ce domaine lui doit des contributions significatives.

Tout au long de sa carrière et après son passage en deuxième section il a apporté une contribution remarquable à de nombreux organismes traitant de la mer. Il a été membre de 1955 à 1959 (président en 1958) du comité consultatif des sciences de la mer de l'UNESCO, organisme d'où sont issus depuis le comité spécial de la recherche océanique (SCOR) et la commission océanographique intergouvernementale (COI). Il a été aussi secrétaire adjoint de l'association internationale pour les sciences physiques de l'océan de 1957 à 1967 et président du comité des marées de cette association de 1965 à 1975. Il a également été président de la commission des levés hydrographiques de la fédération internationale des géomètres (FIG), membre de l'Académie de Marine, et membre du comité de perfectionnement de l'institut océanographique. Enfin il a coopéré très activement à l'organisation de la recherche océanographique française, notamment au sein du comité d'exploration des océans, du centre national de la recherche scientifique et du Comité National Français de Géodésie et de Géophysique (CNFGG), dont il fut président.

Avant d'être nommé directeur du service, l'ingénieur général Eyriès était affecté à la direction du service hydrographique et océanographique de la marine comme chef du bureau



établissements et missions, qui organise et contrôle l'ensemble des travaux du service, en mer et à terre.

L'ingénieur général (hydrographe) Marc Eyriès a cessé le 5 octobre 1981 ses fonctions de directeur du service hydrographique et océanographique de la marine, qu'il exerçait depuis le 1^{er} février 1976, au terme d'une carrière bien remplie qui lui a valu une grande notoriété dans les milieux hydrographiques et océanographiques du monde entier.

Il était Commandeur de la Légion d'honneur, Commandeur de l'Ordre national du Mérite, titulaire de la Croix de Guerre 39-45 avec palmes, Officier des Palmes académiques, Officier du Mérite maritime et Chevalier de l'Ordre de l'Étoile d'Anjouan et de l'Ordre de l'Étoile noire. Ses travaux scientifiques et techniques lui ont valu l'attribution en 1964 du Prix Plumey de l'Académie des Sciences et en 1978 de la Grande Médaille d'or de l'Ordre des Géomètres.

Nous, hydrographes en activité et plus anciens, sommes tous tristes aujourd'hui de la disparition de Marc Eyriès et nous associons de tout coeur à la douleur de sa famille et de ses amis.

SITUATION DE L'HYDROGRAPHIE EN AFRIQUE DE L'OUEST

Compte rendu de l'équipe Hydro-Ouest Afrique¹

Michel Le Gouic, ingénieur général de l'armement

RESUMÉ

Cet article relate l'expérience acquise par une équipe internationale d'experts hydrographes de la Commission Hydrographique de l'Atlantique Oriental (CHAtO)², mandatée par l'Organisation Hydrographique Internationale (OHI). Cette initiative avait pour objectif l'audit et le conseil dans les pays de l'Ouest Africain pour déterminer les améliorations possibles concernant la cartographie marine et la sécurité de la navigation dans les pays de la zone NAVAREA II. Les enseignements retirés peuvent être reconduits dans d'autres zones de navigation par les états riverains.

ABSTRACT

This report provides information collated by an international team of hydrographic experts representing the International Hydrographic Organisation (IHO) Eastern Atlantic Hydrographic Commission (EAtHC). The mandate was to collect information in West African countries within NAVAREA II in order to determine what could be done to improve charting and safety of navigation in the area. The experience gained could be applied to other maritime regions of the world.

¹ Ont participé aux visites : Michel Le Gouic, Michel Even et Dominique Baggio (France), Fernando Pimentel et Paolo Brandao (Portugal), Ian Turner et Mike Barrit (Royaume Uni) et Bob Bullard (Etats-Unis)

² La coopération internationale en matière d'hydrographie est coordonnée par l'Organisation Hydrographique Internationale (OHI) qui agit en particulier à travers des commissions hydrographiques régionales réunissant régulièrement les pays d'un même bassin de navigation. La Commission Hydrographique de l'Atlantique Oriental (CHAtO) concerne les côtes Ouest de l'Afrique jusqu'au parallèle 6°S.

LA NOUVELLE CONVENTION SOLAS ET LE BESOIN OUEST AFRICAIN

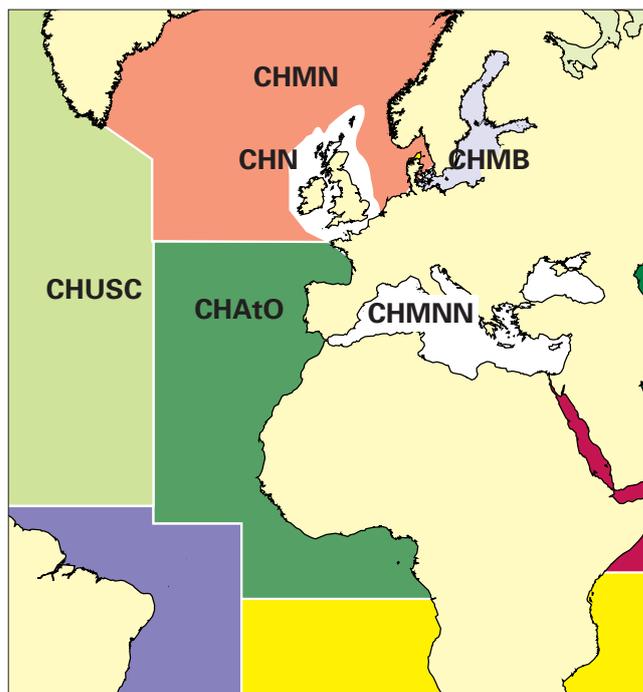
Le Comité de la sécurité maritime de l'Organisation maritime internationale (OMI) a approuvé la révision de la « Convention internationale pour la sauvegarde de la vie en mer (SOLAS) ». La version révisée du chapitre V a été adoptée en décembre 2000 et est entrée en vigueur en juillet 2002. Cette nouvelle rédaction de la convention SOLAS établit en particulier de façon détaillée les obligations des Etats maritimes en matière de services hydrographiques. Les règles 4, 9 et 31 du chapitre V sont les plus pertinentes dans ce domaine (annexe 1) et concernent respectivement les avertissements de navigation, les services hydrographiques et les messages de danger. Globalement, les gouvernements des Etats côtiers sont dans l'obligation de prendre des dispositions pour recueillir, traiter, diffuser, entretenir pour leurs eaux, les informations et services hydrographiques nécessaires à la sécurité de la navigation.

Dans de nombreux pays africains, de tels « services hydrographiques » sont assurés par l'intermédiaire de pays européens avec lesquels ont été établis de forts liens institutionnels. Des pays comme l'Espagne, la France, le Portugal et le Royaume-Uni assurent la tenue à jour des cartes marines et des ouvrages nautiques à partir des données recueillies par les Etats africains concernés ou les navigateurs eux-mêmes. Mais les données de base de nombreuses cartes remontent à plus de 40 ans et, par conséquent, peuvent ne plus être adéquates. La connaissance hydrographique n'est souvent plus adaptée aux réalités actuelles en matière de navigation maritime internationale, de protection de l'environnement ou d'exploitation des ressources.

Lors des 6^e et 7^e réunions de la CHAtO, en juin 2000 et octobre 2002, la situation a été jugée préoccupante par l'ensemble des participants membres de l'Organisation Hydrographique Internationale, membres associés de la commission et observateurs, et un projet baptisé Hydro-Ouest Afrique (HOA) a été créé. Le lancement de la première étape du projet a été décidé, et une visite a été effectuée par un groupe d'experts en hydrographie, cartographie marine et diffusion de l'information nautique, dans les pays pour lesquels des insuffisances en matière de levés, de cartes ou de renseignements nautiques ont été identifiés et qui souhaitaient accueillir le groupe. L'objectif de la visite était d'évaluer les capacités hydrographiques des pays dans la perspective de conseiller les autorités nationales compétentes sur la façon d'améliorer la collecte et la diffusion des informations nautiques, et de progresser grâce à la coopération régionale. L'étape suivante a été arrêtée lors de la 8^e réunion de la CHAtO en fin d'année 2004, en tenant compte des résultats et propositions résultant de la visite technique.

LES TROIS ÉTAPES DE DÉVELOPPEMENT ET LA NÉCESSITÉ D'OFFICIALIZER LE PROCESSUS PAR DES ACCORDS

Pour atteindre la capacité complète de la maîtrise en hydrographie et cartographie marine, il est usuel de distinguer trois étapes de développement (annexe 2).



Zone couverte par la commission hydrographique de l'Atlantique Oriental (CHAtO).

La première, la plus urgente et la plus facile à mettre en œuvre, consiste à organiser la collecte et la circulation d'informations nautiques, nécessaires à l'entretien et à la mise à jour des cartes et publications existantes. Une telle organisation permet de réunir, autour d'un thème bien défini, tous les organismes concernés par les activités maritimes. Elle offre un avantage immédiat pour la navigation internationale et permet d'intégrer véritablement le pays dans le Service Mondial d'Avertissement de Navigation (SMAN).

En toute logique, la seconde étape consiste à créer des capacités hydrographiques, en premier lieu pour intervenir dans la zone côtière où les besoins sont habituellement les plus urgents. En règle générale, une petite structure suffit pour collecter les données requises pour la plupart des projets côtiers, comme par exemple les levés pour les accès aux ports. L'exploitation cartographique de ces nouveaux levés peut souvent être gérée au mieux par une autorité cartographique historique.

La troisième étape consiste à acquérir les moyens de produire des cartes et des publications de manière indépendante. Il s'agit d'une action d'envergure qui peut être facilitée par une étroite coordination avec l'autorité cartographique historique. Cette étape nécessite non seulement des ressources humaines et financières, mais également un réseau de distribution des documents ainsi que les moyens d'en assurer la tenue à jour.

Si la première étape est facilement réalisable rapidement à très peu de frais, la seconde est envisageable à plus long terme car elle suppose des formations et des acquisitions d'équipements. L'investissement financier demeure faible comparativement aux recettes d'un port par exemple. Par contre la troisième étape plus lourde en investissements financiers et humains, est plus longue à mettre en place ;

elle peut généralement être sous-traitée à un service hydrographique déjà constitué, au moins dans une phase transitoire.

Sans être écrit explicitement dans le chapitre V de la nouvelle convention SOLAS, les gouvernements des états signataires sont de facto obligés d'officialiser le processus adopté, compte tenu de l'engagement de leurs responsabilités. Par ailleurs, le gouvernement d'un service hydrographique élaborant et diffusant des cartes et ouvrages nautiques pour le compte d'un autre, engage également sa responsabilité. L'élaboration et la signature d'arrangements techniques entre pays deviennent nécessaires afin de préciser clairement la répartition des tâches, notamment celles effectuées au niveau national et celles confiées à un autre état.

LES VISITES

Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine française (SHOM), chargé de coordonner le projet HOA, a demandé aux États côtiers d'Afrique de l'Ouest, depuis le Maroc jusqu'à la République démocratique du Congo, de signifier leur intérêt à recevoir la visite d'une équipe d'experts techniques. Dix-sept États ont répondu positivement, et 16 pays ont été visités en quatre missions entre l'automne 2002 et le printemps 2004 (voir tableau 1). L'équipe d'experts a été constituée de représentants des pays ayant une responsabilité cartographique directe dans la région (France, Royaume-Uni et Portugal) et d'un représentant des États-Unis d'Amérique.

Tous les pays visités sont membres de l'Organisation Maritime Internationale (OMI), et nombre d'entre eux appartiennent à l'organisation maritime régionale de l'Afrique centrale et occidentale (OMAOC) et à l'association de gestion des ports de l'Afrique centrale et de l'ouest (AGPAOC).

En général, l'équipe a pu rencontrer des responsables à trois niveaux :

- au plus haut niveau avec des ministres ou leurs directeurs de cabinet, il fut possible de faire prendre conscience des responsabilités contractées par les gouvernements et de mettre en évidence la contribution importante de l'hydrographie pour le développement de l'économie maritime,
- au niveau décisionnel, avec les autorités maritimes et les gestionnaires gouvernementaux ou des ports, les aspects liés à la planification, aux financements et les questions générales touchant les affaires maritimes, purent être discutées : ce niveau décisionnel joue un rôle essentiel dans la mise en place et le suivi des actions proposées,
- au niveau des opérateurs, des rencontres ont eu lieu avec les hydrographes portuaires et les capitaines de port, qui ont apprécié les encouragements, conseils et assistances apportés.

SITUATION GÉNÉRALE

L'équipe a pu constater l'hétérogénéité entre les pays visités (tableau 1).



Visite en 2002 au Nigéria.

Dans la plupart des cas, il n'existe pas une autorité unique ayant la responsabilité globale de la sécurité de navigation, et le partage de cette responsabilité entre les autorités portuaires, l'autorité maritime nationale et la marine nationale n'est pas toujours clair.

Tableau 1 : Évaluation des capacités hydrographiques nationales

Dans de nombreux pays visités, les délimitations des frontières maritimes ne sont pas achevées. Les conversations avec les autorités de nombreux pays ont été l'occasion pour l'équipe d'expliquer l'importance des relevés hydrographiques récents et des cartes marines qui en sont déduites. Contrairement aux frontières terrestres qui peuvent être matérialisées par des bornes et des dispositifs de contrôle, la frontière maritime n'est pas tangible. La carte marine constitue son unique support, y compris juridique. Il en est de même pour les limites de juridiction comme celle de la Zone Economique Exclusive, qui sont déterminées à partir des lignes de base elles-mêmes établies à partir du trait de côte de la carte marine.

Les dispositifs de défense et de sécurité sont en général considérés comme faiblement développés dans la plupart des pays visités. Des inquiétudes ont souvent été exprimées concernant la piraterie et autres activités criminelles en mer. Les forces navales et les gardes côtes sont souvent insuffisamment financés et équipés pour mener à bien leurs responsabilités, et les infrastructures en matière de surveillance côtière ou de communications sont souvent inadéquates. De ce fait, sauf exception, les forces militaires ne sont en général pas en position de jouer un rôle clé pour la coordination en matière de SMDSM, par exemple pour la diffusion de renseignements de sécurité maritime (RSM) ou pour la recherche et le sauvetage en mer (SAR).

Actuellement la priorité doit être donnée à la mise en place de l'étape 1 du développement hydrographique, qui permettra de définir clairement les responsabilités des divers organismes impliqués et d'établir un point focal pour la collecte et la diffusion des RSM.

Pays	Membre de l'OHI	Membre de l'OMI	Membre de l'AIMS	Membre de la CHATO ³	CHN ⁴ Proposé	Capacité Étape 1	Capacité Étape 2	Capacité Étape 3
Cap Vert	Non	Oui	Non	M associé	Oui	Partielle	Non	Non
Mauritanie ⁵	En cours	Oui	Non	M associé	Non	Non	Non	Non
Sénégal	Non	Oui	Oui	M associé	Oui	Partielle	Oui	Partielle
Gambie	Non	Oui	Non	Non	Oui	Partielle	Non	Non
Guinée-Bissau	Non	Oui	Non	M associé	Non	Non	Non	Non
Guinée	Non	Oui	Non	M associé	Oui	Partielle	Partielle	Non
Sierra Leone ⁶	Non	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
Ghana	Non	Oui	Oui	M associé	Oui	Partielle	Partielle	Non
Togo	Non	Oui	Non	Non	Oui	Partielle	Non	Non
Bénin	Non	Oui	Oui	M associé	Oui	En instance	Oui	Non
Nigeria	Oui	Oui	Non	Membre	Oui	Partielle	Partielle	Partielle
Guinée Équatoriale	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non
Cameroun ⁷	Non	Oui	Oui	M associé	Oui	Partielle	Oui	Non
Gabon	Non	Oui	Non	Non	Oui	Partielle	Partielle	Non
Rép. du Congo	Non	Oui	Non	M associé	Oui	Partielle	Non	Non
R.D.C	Non	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non ?	Non

SITUATION DÉTAILLÉE ET PROPOSITIONS POUR LE DÉVELOPPEMENT DE CAPACITÉS HYDROGRAPHIQUES

Comité hydrographique national ou Comité de sécurité maritime

L'importance de l'hydrographie pour le développement des États maritimes a bien été comprise à tous les niveaux et dans la plupart des pays visités un groupe de haut niveau pourrait être créé facilement pour étudier les questions hydrographiques ou plus généralement celles de la sécurité maritime. A côté de l'érosion côtière pour certains États, ou de l'exploitation pétrolière off-shore pour d'autres, il a été noté que la sécurité maritime était un sujet d'intérêt majeur commun à tous. L'équipe a attiré l'attention sur les nouvelles règles SOLAS qui confèrent des responsabilités aux gouvernements contractant pour la fourniture de services d'hydrographie, tout en observant que les seules capacités hydrographiques nationales sont souvent celles des autorités portuaires. Cela illustre le besoin d'une coordination et d'une planification à haut niveau pour utiliser au mieux des ressources limitées, en vue de proposer ces services hydrographiques au niveau national. La Défense a invariablement un

rôle à jouer dans un groupe de coordination, toujours en qualité d'utilisateur des services hydrographiques, et parfois en tant qu'entité disposant des compétences hydrographiques nécessaires. Dans les pays disposant de ressources pétrolières off-shore, les remontées des informations hydrographiques intéressant la sécurité nautique et collectées par les exploitants pétroliers ne s'effectuent en général pas de façon efficiente. La participation d'un représentant des principales sociétés pétrolières au comité hydrographique national et/ou au comité de sécurité maritime est recommandée.

Un mandat type pour un comité de sécurité maritime a été proposé (annexe 3).

Potentiel pour le développement d'une capacité hydrographique ou pour une amélioration des relations avec les autorités impliquées dans la coopération

Les pays ont généralement exprimé une volonté d'améliorer la sécurité de navigation dans leurs eaux et de construire une capacité nationale en hydrographie qui serve leurs besoins futurs. L'équipe a insisté pour que le développement d'une capacité hydrographique s'effectue par étapes cohérentes, la première consistant à disposer d'une organisation

3 Commission hydrographique de l'Atlantique oriental.

4 Comité hydrographique national.

5 La Mauritanie a postulé, mais n'a pas encore adhéré.

6 Demande d'adhésion effectuée.

7 Demande d'adhésion effectuée.

pour le recueil et la diffusion des informations nautiques. Dans la plupart des cas, de nombreuses informations étaient connues localement mais non transmises aux autorités chargées de leur diffusion ou de la tenue à jour des documents nautiques. Le point focal le plus évident est constitué par les capitaineries, mais l'information côtière relève souvent d'autres organismes comme la marine militaire ou l'administration des pêches, ou de celle de l'énergie en cas d'exploitation pétrolière. Il y a alors un besoin d'améliorer la coordination entre ces autorités.

Quelques pays visités disposent d'hydrographes portuaires qualifiés. Ils sont souvent les seuls experts techniques en hydrographie et doivent être considérés comme la base d'un développement de capacités hydrographiques. Dans certains pays, le fait de disposer de plusieurs hydrographes entraînés pour contrôler les relevés hydrographiques qui sont sous-traités, semble être une solution adaptée et pragmatique. Au-delà des limites des ports, il faut identifier les acteurs et les priorités avant de définir les formations complémentaires et les équipements à acquérir. Une coordination entre les différentes autorités est alors nécessaire. Par exemple la marine est souvent responsable des épaves en dehors des ports, mais les moyens de les rechercher et de les positionner sont souvent partagés entre la marine et les autorités portuaires. Une fois encore, la communication et la coordination sont essentielles pour une organisation efficace.

Actions prioritaires concernant le Système Mondial de Détresse et de Sécurité en Mer (SMDSM)

Il n'existe actuellement aucune station NAVTEX le long des côtes d'Afrique de l'ouest et un seul des pays visités adresse des RSM au coordonnateur NAVAREA II (Etablissement principal du SHOM – EPSHOM - à Brest).

A moyen terme, plusieurs pays visités ont fait part d'intentions pour le développement de couvertures SMDSM en zones A1 (VHF) et certains ont décidé de mettre en place une couverture pour la zone A2 (HF) comme le Sénégal ;



Visite au port de Cotonou (Bénin).

mais à l'exception du Ghana, aucun n'a présenté une planification d'implantation opérationnelle. Par ailleurs, il est nécessaire d'assurer une couverture efficace au moindre coût ; compte tenu de la faible longueur côtière de certains pays au regard de la grandeur de la zone couverte par une station NAVTEX, une concertation régionale serait judicieuse pour déterminer l'implantation des stations le long de la côte. Un point de contact national devrait être identifié afin de dialoguer avec les instances de l'OMI.

A court terme, tous les pays ont été invités à envisager le recours à SafetyNET comme solution intérimaire avant l'implantation de stations NAVTEX et à prendre contact avec le coordonnateur NAVAREA II à l'EPSHOM à Brest. Pour utiliser cette solution, chaque pays doit organiser la collecte et la validation des informations nautiques, et doit mettre en place un point focal opérationnel 24 heures sur 24.

Perspectives de coopération régionale

Les différences entre les pays (linguistique, politique, capacitaire ...) semblent rendre difficile des perspectives communes : en tout cas le sujet n'a généralement pas pu être valablement abordé. De plus la stabilité économique et politique est nécessaire pour que des initiatives régionales puissent être lancées. Cependant quelques coopérations existent et/ou méritent d'être développées :

- une concerne la Mauritanie, le Sénégal, la Gambie qui utilisent des moyens uniques et complémentaires : baliseur, drague ;
- une autre concerne la station radio côtière de Tema, qui pourrait diffuser des messages pour les pays voisins.

L'étape 1 du développement des services hydrographiques offre l'occasion d'une concertation régionale des agences identifiées, qui pourrait être menée par exemple sous l'égide de la CHAto.

Formations

Des propositions ciblées et l'information appropriée sur les possibilités de formation en Europe, dont l'académie maritime internationale de Trieste, et en Amérique du Nord ont été fournies. Si l'on souhaite promouvoir une formation régionale, l'académie maritime du Ghana représente une possibilité pour les futures formations en hydrographie.

Financements

D'une façon générale, les revenus perçus à travers des taxes portuaires pourraient être en partie réinvestis dans la maintenance des routes d'accès et du balisage.

Il a en outre été observé qu'il existe de nombreuses sources de revenus provenant de l'activité maritime (en particulier dans les secteurs de la pêche et de l'énergie) et diverses aides financières qui sont liées à certaines de ces activités. Si l'hydrographie en tant que telle (y compris la cartographie marine) n'a que peu de chances de susciter le développement d'un projet subventionné, elle apparaît (souvent implicitement) dans la plupart des projets maritimes et devrait pouvoir être prise en compte à travers un projet

pluridisciplinaire (balisage, protection environnementale, pêche, agriculture, développement d'infrastructures en mer, ...).

LES PREMIERS RÉSULTATS

Les seize comptes rendus de visites listent plus de cent vingt propositions qui peuvent être classées en trois catégories :

1. Propositions de coordination et de développement des capacités : Elles peuvent être généralement menées au niveau national. Elles concernent principalement : le Comité Hydrographique National, l'organisation des Renseignements sur la Sécurité Maritime et le Système Mondial de Détresse et de Sécurité en Mer, le retour sur investissement des initiatives en hydrographie, et la création d'une capacité de levé (étape 2),

2. Propositions d'assistance : Elles concernent principalement : les formations, les équipements et les financements. Elles peuvent impliquer un pays étranger. Celles concernant les formations ne présentent généralement pas de difficulté.

3. Le suivi des actions :

- la création d'un Comité Hydrographique National
- la fourniture de prestations hydrographiques en conformité avec la convention SOLAS
- la promulgation effective et en temps opportun de l'information nautique
- l'encouragement à développer une capacité hydrographique
- l'encouragement à la clarification des responsabilités selon la convention SOLAS au travers d'arrangements bilatéraux.

Les premières réactions sont apparues et concernent notamment :

- le Cap Vert, avec un renforcement des liens entre les autorités portuaires avec le service hydrographique portugais ; 7 actions de coopération sont en cours sous l'impulsion du ministre des Infrastructures et des transports du Cap Vert,
- le Maroc, la Mauritanie et le Sénégal dont des représentants sont venus visiter l'EPSHOM et le centre de coordination NAVAREA II,
- la France et le Sénégal, premiers pays à préparer un arrangement administratif conformément à la nouvelle convention SOLAS,
- le Togo avec l'élaboration d'un comité hydrographique national et le Nigeria avec le projet de développer un comité analogue,
- le Bénin et le Nigeria qui ont demandé la formation de techniciens en hydrographie à la France et au Royaume-Uni.

Parallèlement, les navires américains *LITTLEHALES* et *HENSON* et les navires français *BEAUTEMPS-BEAUPRÉ*, *LAPÉROUSE* et *BORDA* ont récemment effectué des levés au large de quelques grands ports. Ces campagnes se poursuivront dans les prochaines années.

La réunion de la CHATO en France au dernier trimestre 2004 a été l'occasion de renforcer les liens des états riverains en matière hydrographique et de préparer les suites du projet HOA. Un atelier consacré à la convention SOLAS et au système des Renseignements sur la Sécurité Maritime a été réalisé avant la tenue de la conférence.

Beaucoup de décisions pour améliorer la sécurité en mer doivent être prises au niveau politique. Les premières actions pourraient créer une dynamique et faire finalement boule de neige. Ces expériences pourraient également être utiles dans d'autres zones de navigation.

ANNEXE 1

CONVENTION SOLAS (Safety Of Life At Sea) de l'OMI (extraits)

CHAPITRE V

SÉCURITÉ DE LA NAVIGATION

Règle 4 : Avertissements de navigation

Chaque Gouvernement contractant prend toutes les mesures nécessaires pour que les renseignements concernant un danger quelconque, reçus d'une quelconque source digne de foi soient promptement portés à la connaissance des personnes concernées et communiqués aux autres gouvernements intéressés (1).

Règle 9 : Services hydrographiques

1 Les Gouvernements contractants s'engagent à prendre des dispositions en vue de rassembler et de compiler des données hydrographiques et de publier, diffuser et tenir à jour tous les renseignements nautiques nécessaires à la sécurité de la navigation.

2 Les Gouvernements contractants s'engagent notamment à coopérer pour assurer, dans la mesure du possible, les services de navigation et d'hydrographie ci-après de la manière la plus appropriée pour faciliter la navigation :

- .1 veiller à ce que les levés hydrographiques soient exécutés de manière à satisfaire, dans la mesure du possible, aux exigences de la sécurité de la navigation ;
- .2 élaborer et diffuser des cartes marines, des instructions nautiques, des livres des sphères, des annuaires des marées et d'autres publications nautiques, s'il y a lieu, qui répondent aux besoins de la sécurité de la navigation ;
- .3 diffuser des avis aux navigateurs pour que les cartes marines et publications nautiques soient, autant que possible, tenues à jour ;
- .4 fournir des moyens de gestion des données pour appuyer ces services.

3 Les Gouvernements contractants s'engagent à veiller à ce que les cartes marines et les publications nautiques soient aussi uniformes que possible et à tenir compte, dans la mesure du possible, des résolutions et recommandations internationales pertinentes (2).

4 Les Gouvernements contractants s'engagent à coordonner leurs activités autant que faire se peut afin de veiller à ce que les renseignements hydrographiques et nautiques soient disponibles à l'échelle mondiale d'une manière aussi rapide, fiable et claire que possible.

Règle 31 : Messages de danger

2 Chaque Gouvernement contractant prend les mesures nécessaires pour que toute information reçue concernant un danger prévu au paragraphe 1 soit promptement portée à la connaissance des intéressés et communiquée aux autres gouvernements auxquels elle peut être utile.

(1) Se reporter au Service mondial d'avertissements de navigation, que l'Organisation a adopté par la résolution A.706 (17), telle que modifiée.

(2) Se reporter aux résolutions et recommandations appropriées qui ont été adoptées par l'Organisation hydrographique internationale

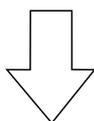
ANNEXE 2

ÉTAPES POUR LE DÉVELOPPEMENT DE CAPACITÉS EN HYDROGRAPHIE ET CARTOGRAPHIE MARINE

Étapes du développement

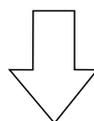
Étape une

Collecte et circulation de l'information nautique permettant la tenue à jour de la documentation nautique (cartes et ouvrages).



Étape deux

Création d'une capacité de levé, d'abord pour les zones côtières, puis pour le large.



Étape trois

Production autonome de cartes et ouvrages nautiques.

Action nationale

- Former un comité national de la sécurité maritime.
- Créer/améliorer les infra-structures existantes pour la collecte et la circulation de l'information nautique.
- Renforcer les liens avec l'autorité cartographique afin d'assurer la tenue à jour des documents nautiques.
- Une formation est nécessaire.

- Etablir une capacité de levés pour les ports et leurs approches.
- Entretenir les aides à la navigation.
- Etablir une capacité de levés pour les zones côtières, puis les zones du large.
- Rechercher les fonds pour la formation, l'équipement ou pour la commande de levés.

- Cette étape est-elle nécessaire ? (elle suppose des investissements conséquents pour la production, la distribution et la tenue à jour des stocks).
- Un accord bilatéral peut être une solution plus avantageuse et plus simple.

ANNEXE 3

PROPOSITIONS DE MANDAT ET DE TACHES POUR UN COMITÉ NATIONAL SUR LA SÉCURITÉ MARITIME

MANDAT D'UN COMITÉ SUR LA SÉCURITÉ MARITIME

⇒ Conseiller les autorités gouvernementales pour :

- * la sécurité de navigation dans les eaux nationales
- * le recouvrement des ressources et des financements pour les services de sécurité maritime
- * les implications des conventions maritimes internationales
- * l'application des lois nationales dans les zones maritimes

⇒ Le CSM

- * devrait impliquer la marine nationale, les ministères en charge du transport, des communications, des ressources naturelles, de l'environnement, des ports, ainsi que des représentants des compagnies de navigation
- * doit se réunir régulièrement pour observer le développement maritime et reviser la politique maritime nationale
- * peut inviter des observateurs régionaux traitant de sécurité de navigation

TACHES DU COMITÉ SUR LA SÉCURITÉ MARITIME

⇒ Se faire reconnaître par le Gouvernement

⇒ Soumettre une structure pour les responsabilités en matière de :

- * informations de sécurité maritime
- * levés hydrographiques
- * cartographie nautique
- * aides à la navigation
- * combat des pollutions par hydrocarbures
- * recherche et sauvetage
- * applications des règlements et lois dans la ZEE

⇒ Conseiller le gouvernement sur les normes internationales et leur mise en oeuvre

⇒ Soumettre au Gouvernement des propositions pour le recouvrement des revenus et le financement du service assuré

⇒ Conseiller le Gouvernement pour l'adhésion aux instances internationales pertinentes

RÉFÉRENCES DE HAUTEUR EN HYDROGRAPHIE

par Bernard Simon, ingénieur sur contrat

RÉSUMÉ

Géoïde, ellipsoïde, nivellement terrestre, niveau moyen, niveau des plus basses mers, sont autant de références utilisées en hydrographie. Les techniques mises en œuvre lors des travaux hydrographiques, depuis les levés jusqu'à la confection des cartes marines, nécessitent la cotation du zéro hydrographique par rapport à l'une ou l'autre de ces références.

Cela suppose d'une part des définitions précises, d'autre part une évaluation critique des critères de conformité relatifs à toute référence, à savoir : stabilité, accessibilité, précision, exactitude.

ABSTRACT

Geoid, ellipsoid, land levelling, mean sea level, lowest astronomical tide, are reference levels used by hydrographers. From survey to chart production, hydrography operational techniques, require precise levelling of chart datum with reference to one of these levels.

This presupposes in one hand, precise definitions and, in the other, a critical assessment of consistency with general reference level requirements: stability, accessibility, precision, accuracy.

Le choix et la réalisation des références verticales ainsi que leurs cotations relatives constituent des problèmes fondamentaux en hydrographie.

Ces problèmes sont traditionnels, mais les technologies nouvelles, liées essentiellement aux observations satellitaires et à l'évolution des moyens informatiques modifient profondément la façon de les aborder.

Les systèmes de positionnement GPS/Glonass/Galileo, le développement de l'altimétrie spatiale, la reconnaissance par toute la communauté géodésique d'un système unique de référence internationale, l'ITRF, la détermination du champ global de gravité de la Terre avec une résolution spatiale toujours meilleure, ainsi que le développement de modèles hydrodynamiques de plus en plus performants, amènent à considérer de nouveaux systèmes de référence. Cependant, les systèmes traditionnels demeurent, et il est nécessaire de pouvoir coter précisément ces référentiels les uns par rapport aux autres.

La réduction des sondages hydrographiques consiste à rapporter les profondeurs mesurées au sondeur à un niveau arbitraire mais précisément défini, auquel peut être rattaché le niveau de référence des cartes marines, appelé zéro hydrographique, avec une précision suffisante pour les besoins de la navigation. Cette opération consiste à résoudre deux problèmes :

- coter dans un référentiel connu le zéro hydrographique, fonction de la position géographique,
- coter, par rapport à cette référence, le niveau marin qui varie à la fois avec la position géographique et avec l'instant du sondage.

Ces problèmes sont en grande partie indépendants (même si les cotations sont issues des mêmes mesures et des mêmes traitements – en particulier, les méthodes traditionnelle et spatiale reposent toutes deux sur l'analyse et la prédiction de la marée) et peuvent être résolus à l'aide de techniques différentes.

1. DÉFINITIONS

Les principes à la base de la réduction des sondages sont élémentaires mais peuvent aboutir à des interprétations erronées ou confuses à cause du sens imprécis attribué à certains termes. En particulier, les références de hauteur effectivement utilisées sont diverses, et il est nécessaire d'en bien préciser le sens afin de les situer les unes par rapport aux autres.

Par ailleurs, les techniques spatiales permettant des mesures différentes des mesures classiques, il est indispensable de définir des références et des procédés de réduction rigoureux.

1.1 Caractéristiques du zéro hydrographique

Le zéro hydrographique, référence commune aux cartes marines et aux annuaires de marée, présente deux caractéristiques fondamentales :

- il est défini en fonction de critères marégraphiques visant la meilleure sécurité possible pour la navigation : c'est une estimation du niveau des plus basses mers astronomiques possibles, selon les recommandations de l'OHI (Organisation Hydrographique Internationale),

- il est coté dans un référentiel terrestre, soit (traditionnellement) par rapport à un repère stable situé à proximité d'un marégraphe terrestre, soit (désormais) par rapport à une surface de référence, de manière à assurer sa conservation sur le long terme et à permettre ainsi d'utiliser avec cohérence des levés effectués à des époques différentes. Cette surface devra être rapportée à un système de référence internationale tel que l'ITRF (International Terrestrial Reference Frame).

Aux abords des stations marégraphiques côtières, ces deux problèmes sont résolus grâce à l'analyse des observations et à la possibilité de coter celles-ci par rapport à des repères implantés à proximité des marégraphes, repères eux-mêmes cotés dans des réseaux de nivellement terrestre.

Au large, il est nécessaire de recourir à des modèles de marée, qui doivent être évalués en fonction de leur aptitude à fournir pour le zéro hydrographique des résultats répondant aux critères de qualité requis pour tout référentiel, à savoir : précision, accessibilité, stabilité, exactitude.

1.2 Niveau des plus basses mers astronomiques

Le zéro hydrographique doit être, selon la recommandation de l'OHI (Organisation Hydrographique Internationale), confondu aussi bien que possible avec le niveau des plus basses mers astronomiques. Le qualificatif « astronomique » signifie qu'il ne s'agit pas d'un niveau directement observé, mais d'un niveau calculé à partir de la force génératrice de la marée due aux actions gravitationnelles de la Lune et du Soleil. Cependant, cette marée « astronomique » est généralement calculée à l'aide de la formule harmonique, basée sur des constantes harmoniques issues de l'analyse d'observations préalables.

Il apparaît deux difficultés.

En premier lieu, la précision du calcul est très variable selon la qualité et la durée des observations préalables disponibles, la correction ou non des effets météorologiques et océanographiques, les méthodes et moyens de calcul, le type et l'amplitude de la marée.

En second lieu, à cette marée astronomique se sont superposées, pendant la durée des observations, des variations de niveau provoquées par d'autres phénomènes (non astronomiques, mais de nature météorologique et océanographique par exemple), ainsi qu'une tendance séculaire de variation du niveau des mers. Il en résulte que son calcul effectué sur la base d'observations réalisées à des époques différentes donnerait des résultats différents et que ce calcul est donc entaché d'incertitude.

Retenons que la notion de niveau des plus basses mers est, d'une part intrinsèquement approximative, d'autre part étroitement liée aux notions de niveau moyen dont il va maintenant être question. Ne respectant pas les critères de précision et de stabilité, il ne peut, en tout rigueur, constituer une référence exacte de hauteurs pour l'hydrographie ; mais une fois calculé, il peut servir à situer le zéro hydrographique qui sera ainsi « approximativement » au niveau des plus basses mers astronomiques.

1.3 Niveau moyen, niveau moyen nominal, surface moyenne océanique (SMO)

Le terme de « niveau moyen » de la mer (NM) est ambigu. Il renvoie en effet intuitivement à une grandeur supposée constante. Or elle est fondamentalement variable puisqu'elle

le dépend de la période pour laquelle elle a été calculée. S'il s'agit effectivement d'une moyenne, elle est obtenue à l'aide de la formule suivante où t_1 et t_N sont les dates de début et de fin des observations et $h(t_n)$ la hauteur mesurée du niveau de la mer à l'instant t_n , l'origine des mesures de hauteur étant fixe et l'intervalle de temps entre mesures étant généralement constant et petit devant l'intervalle entre pleines et basses mers successives.

$$NM_{t_1}^{t_N} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{n=N} h(t_n)$$

En pratique, dans les exposés relatifs à la marée, l'appellation « niveau moyen » n'est pas attribuée à la stricte moyenne des niveaux observés, mais au résultat d'un filtrage numérique (dont la moyenne n'est qu'un cas particulier). Selon un usage établi, on convient d'appeler « niveau moyen instantané » (NMI) le résultat d'une opération consistant à retrancher la marée astronomique des hauteurs mesurées

$$NMI(t) = (\text{hauteur observée à l'instant } t) - \sum A_i \cos(q_i t - \alpha_i)$$

D'après cette définition, le niveau moyen instantané peut, à des fins statistiques, être considéré comme une variable aléatoire qui serait la hauteur de la surface libre en l'absence d'oscillations périodiques dues aux effets astronomiques. La moyenne des NMI donne un résultat plus juste que la simple moyenne des hauteurs car elle minimise les résidus des composantes périodiques, lesquels sont faibles de toute façon sur des périodes longues ; c'est donc généralement à partir du NMI que l'on calcule le niveau moyen NM sur de longues périodes. La difficulté vient du fait que, quelle que soit l'échelle de temps, même assez longue (quelques années), cette variable aléatoire n'est pas stationnaire car la moyenne dépend de l'échantillon considéré. La figure suivante, dans laquelle l'élévation séculaire des niveaux moyens annuels à Brest est mise en évidence, en fournit une illustration parlante.

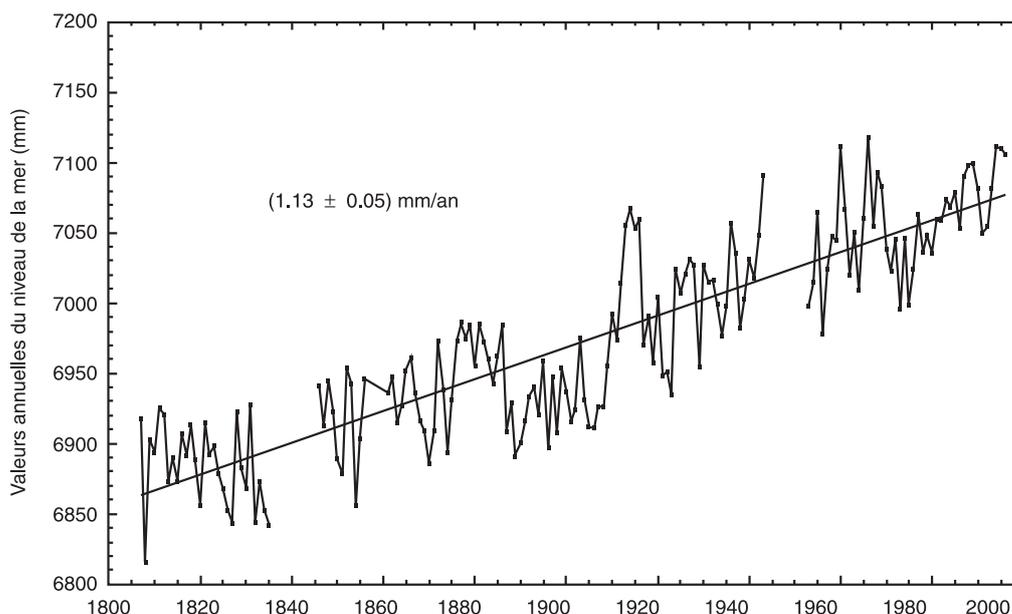


Figure 1 : Niveaux moyens annuels à Brest.

Le niveau moyen (qui devrait être accompagné au moins des dates de début et de fin et de la méthode de calcul) et le niveau moyen instantané, rapportés à un référentiel terrestre, sont fonction du temps. Cette variabilité ne permet pas de conférer à l'un d'eux le statut de référence verticale, car l'un des critères fondamentaux, la stabilité, n'est pas respecté.

Pour les prévisions de marée, on utilise le niveau moyen calculé sur la plus longue période possible que l'on fige par rapport à la terre et aux référentiels terrestres. Ce niveau est appelé « niveau moyen nominal » (NMN). Ce calcul est réalisé pour les sites où les observations de marée sont de longue durée, si possible plusieurs années. Ces sites seront appelés par la suite ports de référence.

Dans l'application de la formule harmonique à la réduction des sondages, on suppose que le niveau moyen instantané et le niveau moyen nominal, et donc aussi tous les autres niveaux moyens, définissent des surfaces parallèles, mais tandis que la cote du niveau moyen instantané est fonction du temps, la cote du niveau moyen nominal rapportée à une référence terrestre est constante.

Par la suite, il sera assez souvent fait mention de la Surface Moyenne Océanique (SMO), calculée à l'aide des mesures altimétriques de satellites. La hauteur ellipsoïdale de la surface de la mer est moyennée en chaque point de la trace, après diverses corrections destinées notamment à éliminer la marée astronomique. Après interpolation pour combler les zones non couvertes entre les traces, le résultat se présente sous la forme d'une surface moyenne, représentative du niveau moyen en chaque point (avec la résolution permise par les écarts entre les traces des satellites) pendant la période d'observation.

On ne sait pas aujourd'hui mesurer la SMO près des côtes par satellite, et la résolution est seulement de quelques dizaines de kilomètres, ce qui limite encore son emploi en hydrographie.

1.4 Géoïde

Un géoïde est une surface équipotentielle du champ de pesanteur terrestre.

Un géoïde est déterminé à terre par nivellement géométrique en utilisant aussi les mesures de gravimétrie ; les repères de nivellement des marégraphes sont, si possible, rapportés à un géoïde, en pratique la surface de référence du nivellement terrestre, que nous appellerons ici « géoïde du nivellement terrestre ».

En mer, le même géoïde peut être prolongé à l'aide de mesures gravimétriques. Un argument important pour l'utilisation d'un géoïde en tant que référence pour la marée est le fait que la référence verticale des modèles mathématiques utilisés pour simuler la dynamique des océans est une équipotentielle du champ de pesanteur. En tout point la verticale locale est perpendiculaire au géoïde. Une erreur très courante consiste à le confondre avec la SMO. Ces deux surfaces doivent en effet être distinguées car la SMO est, par rapport au géoïde, affectée par des phénomènes, qualifiés ici de « météorologiques et océanographiques ». On peut citer la circulation générale océanique (ainsi à une latitude de 45°, un courant de 1 m/s sur 10 km de large crée une dénivellée de 10 cm perpendiculairement au courant), la répartition moyenne des densités, les gradients de pression atmosphérique et les effets non linéaires de la propagation de la marée dans les zones de petits fonds. A eux seuls, les effets non linéaires sont, par exemple en Manche, responsables d'écarts pouvant atteindre une dizaine de centimètres.

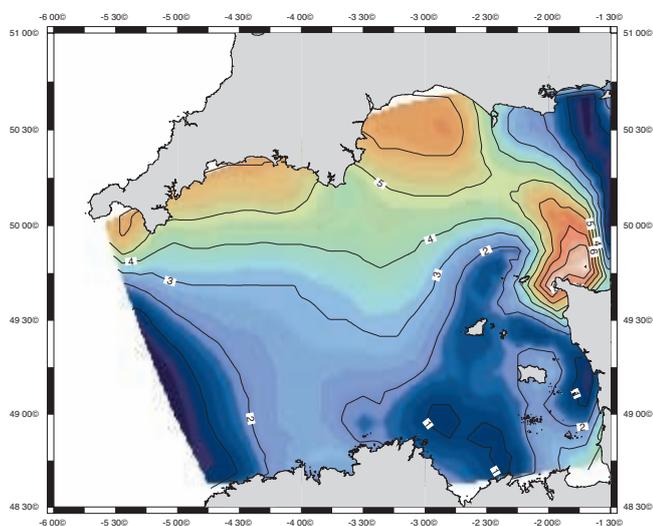


Figure 2 : Influence des effets non linéaires de la marée sur l'écart entre la SMO et le géoïde en cm (calculé par le SHOM avec le modèle utilisé pour la réduction des sondes).

Le géoïde à prendre comme surface initiale des modèles de simulation est également différent du géoïde du nivellement terrestre : le géoïde en mer est une équipotentielle du champ de pesanteur qui correspondrait sensiblement à la surface d'un océan homogène au repos de densité égale à la densité moyenne de l'océan à l'instant initial, soumis à une atmosphère elle-même homogène et au repos. Nous l'ap-

pellons « géoïde marin ». Le géoïde marin n'est pas très éloigné dans sa détermination pratique du géoïde du nivellement terrestre, qui est habituellement calé sur le niveau moyen de la mer, mais éventuellement mesuré à une époque ancienne et en un point éloigné. Il ne coïncide cependant pas avec lui (ne serait-ce qu'en raison de l'évolution séculaire du niveau des mers) et les écarts, qui ne sont pas mesurables aujourd'hui avec précision, pourraient atteindre plusieurs dizaines de centimètres, ce qui est trop pour l'hydrographie et pour l'étude de la circulation océanique.

Il est possible, grâce à la formule harmonique, de coter le niveau des plus basses mers astronomiques, et donc le zéro hydrographique, par rapport au niveau moyen sur la période considérée. Les variations des constantes harmoniques en fonction des variations du niveau moyen sont négligeables dans la pratique, ainsi que dans les modèles, propriété fondamentale pour la détermination du zéro hydrographique et pour la réduction des sondages par la méthode dite traditionnelle, car elle permet de s'affranchir presque complètement de l'incertitude sur la cote du niveau moyen.

Un modèle numérique complet devrait permettre de coter le zéro hydrographique par rapport au géoïde marin, qui est la référence verticale du modèle. Mais c'est en pratique difficilement réalisable car cela suppose une simulation portant sur plusieurs années avec la prise en compte des effets extérieurs météorologiques et océanographiques cités plus haut (hors effets non linéaires de la marée qui sont facilement pris en compte par les modèles). En outre, les décalages relatifs du niveau moyen et du géoïde ne sont pas bien connus aux frontières ouvertes des modèles, ce qui interdit la simulation des circulations résiduelles induites et des variations de hauteur correspondantes.

Pour qu'une telle modélisation puisse être appliquée sur de grandes étendues en utilisant le géoïde marin comme référence, il faudrait d'une part que celui-ci soit calé avec précision dans un repère terrestre (ou spatial) et d'autre part que toutes les variations de la SMO par rapport au géoïde marin soient connues avec précision (cm). Nous sommes encore loin d'une telle connaissance, qui progresse cependant grâce aux techniques spatiales (dont gravimétrie) et aux modélisations.

1.5 Ellipsoïde et ITRF

Un ellipsoïde de référence est une surface mathématique « commode » pour définir un système géodésique à partir des positions relatives de points situés à la surface de la terre. La stabilité de cette référence, comme de toute autre référence géodésique, dépend du nombre et de la répartition géographique des points servant à la définir ainsi que de la diversité des techniques utilisées pour les localiser. L'intérêt de l'ellipsoïde est qu'il est une référence commode, notamment pour certaines techniques spatiales, et en particulier en altimétrie. Selon les recommandations de l'UGGI et de l'AIG de 1991, l'International Terrestrial Reference System (ITRS), réalisé avec l'International Terrestrial Reference Frame (ITRF) devrait être utilisé pour toute application qui requiert une précision meilleure que le mètre. Bien que le WGS84, système de référence du GPS, soit plus populaire, cette

recommandation est toujours valable car l'ITRS est réalisé à partir d'une couverture géographique très dense de plusieurs centaines de points, contre seulement une vingtaine pour le WGS84, et à l'aide de différentes techniques (VLBI, SLR, GPS, DORIS), contre une seule pour le WGS84 (GPS). En pratique, les réalisations des deux systèmes sont assez proches, mais l'ITRS est, sur le plan conceptuel, indépendant de la technique et toute technique nouvelle ayant fait ses preuves peut y contribuer. En particulier, il ne faut pas négliger les évolutions futures et l'apparition de nouveaux systèmes de positionnement (Galileo, ...). Un autre argument (s'il en était besoin) est constitué par le fait que l'ITRS est maintenu et amélioré par la communauté internationale et ne dépend donc ni d'un organisme ni d'un pays mais d'une association scientifique internationale, l'AIG (International Association of Geodesy) qui lui apporte son label de qualité scientifique.

1.6 Repères terrestres et nivellement

Dans les ports, le zéro hydrographique et le niveau moyen nominal sont matérialisés par leurs cotes par rapport à des repères de nivellement. Ces repères sont situés à proximité du marégraphe et sont en nombre suffisant et suffisamment espacés pour qu'ils ne puissent pas être détruits simultanément, par exemple lors de travaux portuaires. Ils sont cotés les uns par rapport aux autres par nivellement géométrique, et si possible rattachés au nivellement général. Il faut souligner que le zéro hydrographique n'est pas défini par sa cote dans le nivellement général. Il est important en effet que la cote du zéro ne soit pas remise en cause par des opérations de nivellement successives qui peuvent donner des résultats différents, non seulement en raison de l'évolution des techniques de mesure, mais aussi en raison de mouvements verticaux terrestres éventuels d'origine tectonique ou sismique. Mentionnons à ce propos que la surcharge due à la marée elle-même peut provoquer des mouvements verticaux (périodiques – comme la marée) des repères (rapportés par exemple au géoïde) pouvant excéder 20 cm ; ces mouvements sont peu significatifs localement pour l'hydrographie puisqu'il s'agit d'un mouvement d'ensemble du socle dont les observations et les modèles tiennent naturellement compte, mais dans certaines zones il sera nécessaire d'en tenir compte pour conserver des précisions centimétriques lorsqu'on utilisera les techniques spatiales.

2. PRÉCISION

La notion de précision comporte deux aspects. Il faut en effet distinguer la précision résultant de la conformité plus ou moins bonne à la définition (plus basses mers), et la précision de la cotation dans un repère.

La définition du zéro hydrographique comporte un côté arbitraire, qui permet une certaine liberté comme en témoigne la diversité des définitions encore en usage. Le fait d'adopter le niveau des plus basses mers est essentiellement une facilité permettant au navigateur de déterminer aisément à partir de quelle sonde portée sur la carte il est nécessaire de prendre en compte la marée, mais la précision de la détermination du zéro hydrographique par rapport au niveau des plus basses mers, n'est pas un critère fondamental : on pourra accepter que les sondes soient rapportées « approxi-

mativement » au niveau des plus basses mers, comme cela est d'ailleurs mentionné très souvent sur les cartes marines. Le deuxième aspect de la notion de précision est relatif au repérage du zéro hydrographique. Une fois adopté, il doit en effet être coté dans un repère stable et accessible. Cette opération est très importante, car le zéro hydrographique devant acquérir le statut de référence verticale, sa qualité principale doit être la stabilité. Pour les observatoires côtiers, la cotation par rapport aux repères doit être effectuée avec le plus grand soin, afin qu'elle ne soit pas à la merci d'une remise en cause par des opérations de nivellement successives. Une précision de l'ordre du millimètre, qui est autorisée sans trop de difficultés par les opérations de nivellement classiques, doit être recherchée. Cette précision est évidemment inutile pour la navigation maritime, mais elle est fondamentale pour évaluer la stabilité des repères et pour certaines études relatives notamment à l'évolution du niveau des mers.

3. ACCESSIBILITÉ

Loin des observatoires côtiers, le principal problème à résoudre est celui de l'accessibilité de la référence verticale.

3.1 Méthode traditionnelle

Au cours des sondages hydrographiques réalisés de manière classique, les deux surfaces directement accessibles sont la surface et le fond. Le fond peut être utilisé, mais très marginalement, pour retrouver la cote du zéro hydrographique à proximité d'un marégraphe dont les repères de nivellement ont disparu. En pratique, pour les levés traditionnels, la seule référence accessible est la surface, qui présente évidemment l'inconvénient de ne pas être stable, ce qui ne peut lui conférer qu'un statut de référence provisoire.

La procédure utilisée classiquement est fondée sur la méthode des concordances qui modélise la correspondance entre les marées de deux points voisins par des régressions linéaires. Elle peut être également comprise comme un nivellement géométrique effectué par l'intermédiaire du niveau de la mer afin de rapporter les hauteurs d'eau aux seuls repères connus qui sont généralement implantés sur la côte à proximité des marégraphes. Il s'agit en fait de situer le zéro hydrographique par rapport à la surface de la mer, à l'endroit et à l'instant de la mesure, à l'aide des constantes harmoniques issues d'un modèle de marée et du décalage supposé constant dans l'espace entre le niveau moyen nominal et le niveau moyen instantané. Une procédure améliorée, mais pas utilisée pratiquement parce que les sondages sont réalisés par temps calme, consisterait à utiliser un modèle incluant les effets météorologiques ; on gagnerait aussi certainement en précision lorsqu'on s'éloigne du port de référence ; par exemple les courants moyens instantanés engendrés par le vent peuvent générer des pentes non négligeables de la surface (le cm pour 10 km n'est pas rare) ; on peut tenir un raisonnement analogue pour les variations de densité, qui peuvent être importantes, notamment aux embouchures de fleuves.

La modélisation¹ permet de calculer, d'une part une hauteur de marée astronomique instantanée au point de sondage, rapportée au niveau moyen

$$A_S(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t) = \sum_i A_{si} \cos[\mathbf{q}_i t - \alpha_{si}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})]$$

d'autre part la cote du niveau moyen nominal $N_S(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ par rapport au niveau des plus basses mers. Cette cote étant une constante en un point donné, son calcul a pu être effectué a priori : elle peut être obtenue à partir d'une cartographie du niveau des plus basses mers rapporté au niveau moyen, obtenue par modélisation numérique, dont la figure suivante donne un exemple.

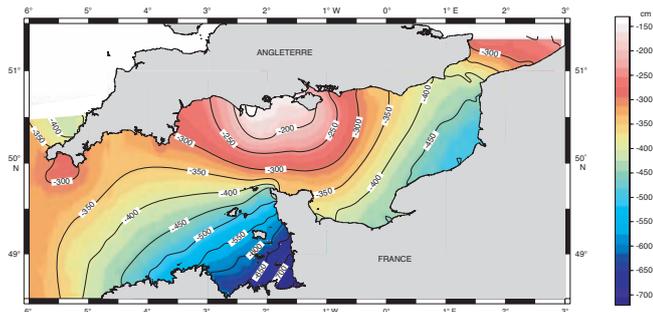


Figure 3 : Niveau des plus basses mers rapporté au niveau moyen : $-N_S(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ (calculé par le SHOM avec le modèle utilisé pour la réduction des sondes).

On obtient ainsi au point de sondage, la hauteur de marée astronomique par rapport au niveau des plus basses mers :

$$H_{AS}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t) = N_S(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) + A_S(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t)$$

Afin d'obtenir la cote de la surface par rapport au zéro hydrographique, cette valeur doit être corrigée pour tenir compte, d'une part des « surcotes-décotes » dues aux effets météorologiques et océanographiques, d'autre part d'un écart éventuel entre le zéro hydrographique et le niveau des plus basses mers au port de référence le plus proche. Cette dernière correction est destinée à éviter les discontinuités dans les valeurs des sondes portées sur les cartes, lorsqu'on s'éloigne du port de référence vers le large.

Soit δh_R la valeur de la surcote-décote au port de référence. C'est l'écart entre la marée observée et la marée prédite ; c'est aussi, en raison du procédé employé pour calculer le niveau moyen instantané, l'écart entre celui-ci et le niveau moyen nominal, et cet écart, comme il a été dit précédemment, est supposé constant dans l'espace. Cette correction est donc appliquée au point de sondage et symbolisée par δh .

Soit δZ_R la cote, rapportée au zéro hydrographique, du niveau des plus basses mers au port de référence. Une valeur non nulle est généralement la conséquence d'une détermination ancienne, éventuellement peu précise et de

l'évolution séculaire du niveau moyen. Une pratique courante consiste à déterminer $\delta Z_S(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$, la cote hydrographique du niveau des plus basses mers au point de sondage, à l'aide d'une concordance en hauteurs, ou ce qui revient pratiquement au même, en posant

$$\frac{\delta Z_S(\mathbf{X}, \mathbf{Y})}{\delta Z_R} = \frac{N_S(\mathbf{X}, \mathbf{Y})}{N_R}$$

où N_R est le niveau moyen nominal rapporté au niveau des plus basses mers au port de référence.

Soient $A_R(t) = \sum_i A_{Ri} \cos(\mathbf{q}_i t - \alpha_{Ri})$, la cote de la marée

astronomique au port de référence R, rapportée au niveau moyen nominal et $H_M(t)$ la hauteur mesurée au marégraphe, rapportée au zéro hydrographique.

En adoptant les notations de la figure 4, la réduction des sondages consiste à calculer la cote du plan d'eau $H(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t)$ à l'endroit du sondage S en effectuant l'opération suivante :

$$H(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t) = H_{AS}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t) + \underbrace{H_M(t) - [A_R(t) + N_R + \delta Z_R]}_{\delta h} + \underbrace{\delta Z_R \frac{N_S(\mathbf{X}, \mathbf{Y})}{N_R}}_{\delta Z_S(\mathbf{X}, \mathbf{Y})}$$

Si S est l'indication du sondeur (« sonde »), la cote Z à porter sur la carte (« sonde réduite ») est :

$$Z = S - H(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t)$$

Remarquons que A_S , A_R , N_S , et N_R sont rapportés au niveau moyen nominal (NMN), qui peut donc être considéré comme une référence de fait. Mais c'est une référence dont le positionnement absolu a peu d'influence sur les sondages, car le NMN intervient à la fois pour déterminer la position du zéro hydrographique par rapport au niveau des plus basses mers astronomiques et pour calculer la marée astronomique en R, et les effets en S de décalages sur ces grandeurs s'annulent presque. En effet, si l'on décale le niveau moyen nominal d'une grandeur ΔN , la cote des plus basses mers astronomiques se décale d'autant, δZ_R est augmenté de la même quantité et δh , mesuré en R, varie de $-\Delta N$. En S, le zéro hydrographique est décalé de $\Delta N.(N_S/N_R)$. Le décalage sur $H_{AS}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t)$, donc sur la sonde Z (en remarquant que δh en S et en R sont égaux à $-\Delta N$), est alors de $\Delta N.(N_S - N_R)/N_R$. Si les amplitudes en R et S sont voisines, ce décalage est négligeable ; si ces amplitudes ne sont pas voisines, l'erreur reste faible tant que l'on ne s'éloigne pas trop des valeurs « vraies » (inconnues) et que l'on choisit bien un zéro hydrographique proche des plus basses mers astronomiques ; par exemple, pour $\Delta N = 20$ cm, ce qui est beaucoup (cf. figure 1)², et pour une variation relative de $(N_S - N_R)/N_R$ égale à 10%, on trouve $\Delta H = 2$ cm, ce qui reste acceptable.

1 Le SHOM utilise actuellement (2005) le modèle TELEMAR décrit dans : Hydrodynamique des écoulements à surface libre (Modélisation numérique avec la méthode des éléments finis), Jean-Michel Hervouet, Les presses de l'ENPC, ISBN : 2-85978-379-2, 2003 336p.

2 La faiblesse des variations relatives des niveaux moyens nominaux de ports voisins par rapport au géoïde terrestre (quelques centimètres) confirme qu'une erreur de 20 cm est très pessimiste, d'autant que beaucoup de ces niveaux ont été déterminés sur des périodes significativement différentes.

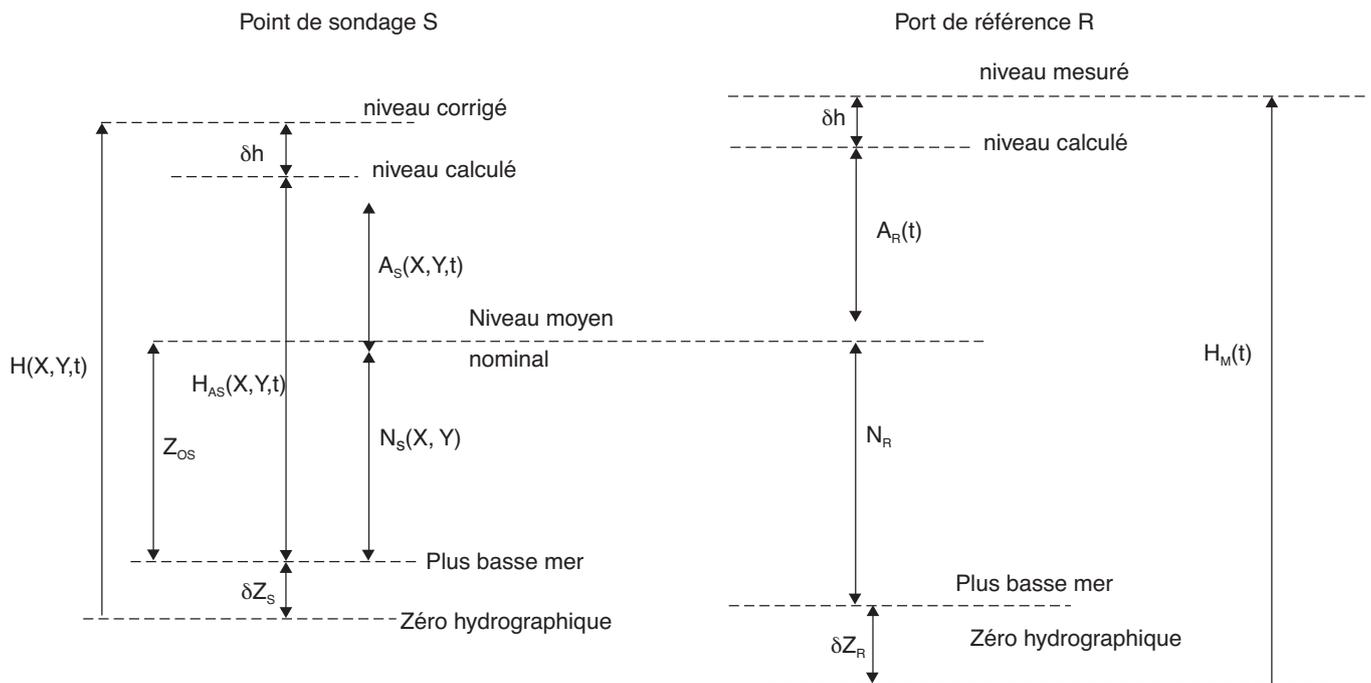


Figure 4 : Correction de sonde, méthode classique.

Il faut souligner une conséquence importante de cette pratique : on reporte au point de sondage un écart éventuel provenant de celui existant au port de référence entre le zéro hydrographique et le niveau des plus basses mers. Si cet écart est faible, cela ne présente que peu d'inconvénient, mais dans le cas d'écarts significatifs, des difficultés peuvent survenir lors d'un changement de port de référence. Pour cette raison le SHOM a institué les « zones de marée » relatives aux principaux ports des côtes de France. Une autre difficulté provient de l'éloignement éventuel du port de référence, pouvant rendre très incertaine la méthode de correction des effets météorologiques et océanographiques par report du δh .

La procédure a pu être améliorée grâce à l'utilisation des marégraphes à capteur de pression posés sur le fond à proximité de la zone de sondage. En effet, si l'on dispose d'un mois d'observations marégraphiques, la méthode dite des « concordances par espèce » permet d'obtenir une marée astronomique suffisamment précise pour qu'il soit possible de faire jouer à ce point de mesure en mer le rôle du port de référence, permettant grâce à sa proximité une meilleure correction des effets météorologiques et océanographiques. Il est cependant nécessaire, au préalable, de coter le zéro hydrographique au point de mesure, par rapport au zéro instrumental du marégraphe immergé.

La méthode décrite ci-dessus permettant de situer le zéro hydrographique par rapport au niveau moyen nominal, il s'agit de coter celui-ci par rapport au zéro instrumental. Pour cela, on utilise l'approximation du parallélisme des diverses surfaces de niveaux moyens entre le port de référence et le marégraphe immergé, mieux vérifiée pour un niveau moyen calculé sur une certaine durée que pour un niveau moyen

instantané (mais on ne peut exclure des biais indétectables sur cette durée) ; le marégraphe immergé permet également de s'assurer de la validité du modèle de marée employé. Ayant calculé la cote instrumentale du niveau moyen au marégraphe immergé pendant la période de mesure, on la corrige de l'écart entre le niveau moyen pendant la même période et le niveau moyen nominal au port de référence. L'utilisation des marégraphes immergés ne dispense donc pas de l'observation de la marée dans un port de référence. Elle ne résout pas le problème des zones de marée, mais elle permet de mieux compenser les effets météorologiques et océanographiques.

3.2 Techniques spatiales

Les techniques spatiales apportent une solution différente au problème de la réduction des sondes.

En premier lieu, il est maintenant possible de coter précisément le fond de la mer dans un repère terrestre sans passer par l'intermédiaire du niveau de la mer et donc sans modèle de marée du milieu liquide. C'est donc une cotation absolue et pérenne, et c'est l'un des grands avantages de ces techniques. Il n'est pas possible aujourd'hui d'effectuer cette cotation en temps réel dans un repère mondial (ITRS par exemple), mais il est possible au voisinage d'une station de référence terrestre de se placer avec précision par rapport à cette station de référence.

Pour être précis, il faut aussi tenir compte des mouvements du socle, qu'on peut considérer comme identiques dans une zone de quelques dizaines de kilomètres pour la marée terrestre, mais pas pour les flexions du socle provoquées par la surcharge océanique, où l'on a déjà observé des gradients

de l'ordre du cm pour 10 km³. Contrairement à la méthode traditionnelle où le modèle de marée (calé sur des observations à la côte et en mer qui englobent à la fois des mouvements de la surface marine et de ceux du fond) compense aussi les mouvements du socle, la méthode spatiale, même dans certaines zones limitées, doit tenir compte de ceux-ci pour conserver la précision.

Il est également possible de positionner précisément dans un repère géodésique (ellipsoïde) la surface moyenne océanique (SMO) obtenue par altimétrie. TOPEX/POSEIDON a déjà permis d'obtenir des résultats satisfaisants et JASON devrait permettre de progresser encore dans cette direction. La précision se dégrade près des côtes du fait de la faible résolution (10 km) et de la prise en compte inopportune de portions de terre dans les calculs ; mais il est possible d'y remédier en tirant parti des observations de marée effectuées à la côte et de leur rattachement à un système géodésique précis. Comme pour la méthode traditionnelle, la détermination du zéro hydrographique doit se faire également, dans les référentiels actuels qui restent locaux (zones de marée), par l'intermédiaire du niveau moyen nominal. Elle consiste à corriger la SMO des écarts entre le niveau moyen calculé au marégraphe de référence pendant la période de mesures altimétriques et le niveau moyen nominal et à appliquer les résultats de la modélisation de la marée pour positionner le zéro hydrographique en tout point de la zone de marée. Connaissant la cote ellipsoïdale de la SMO, on en déduit la cote ellipsoïdale du zéro hydrographique. La référence fondamentale est toujours le zéro hydrographique au port de référence. On a intérêt pour la précision des sondages, en l'état actuel des connaissances, à utiliser un modèle de marée calé sur les observations intégrant mouvements de la surface de la mer et mouvements du socle, comme pour la méthode traditionnelle. C'est de plus la méthode la plus simple. Pour atteindre la précision ultime, il faudrait modéliser tous les

mouvements de la surface et du socle en tenant compte de tous les effets : marée astronomique, conditions météorologiques et conditions océanographiques. L'augmentation de la précision des mesures et celle de la précision des modèles permet d'envisager sérieusement une détermination continue du zéro hydrographique sur de vastes surfaces. Mais l'on est obligé de travailler dans le référentiel cartographique existant, qui est basé sur les zones de marée. Pour passer à un zéro hydrographique continu, il faudra reprendre toutes les cartes, ce qui durera probablement des décennies, car c'est un travail lourd pour lequel aucun service hydrographique n'a les ressources permettant une reprise significativement plus rapide.

Reprenons les notations de la figure 5 :

- E_{SMO} = cote ellipsoïdale de la SMO issue de mesures altimétriques,
- δN_S = différence, au point de sondage entre le niveau moyen nominal et le niveau de la SMO,
- N_S = niveau moyen nominal rapporté au niveau des plus basses mers au point de sondage,
- δZ_S = cote hydrographique de la plus basse mer au point de sondage,
- Z = cote hydrographique du fond au point de sondage,
- E_F = cote ellipsoïdale du fond,
- E_{GPS} = cote ellipsoïdale de la surface libre mesurée par GPS,
- S = profondeur mesurée par le sondeur,
- δN_R = différence, au port de référence entre le niveau moyen nominal et le niveau de la SMO,
- N_R = niveau moyen nominal rapporté au niveau des plus basses mers au port de référence,
- δZ_R = cote hydrographique de la plus basse mer au port de référence,
- E_{RSMO} = cote ellipsoïdale de la SMO au port de référence,

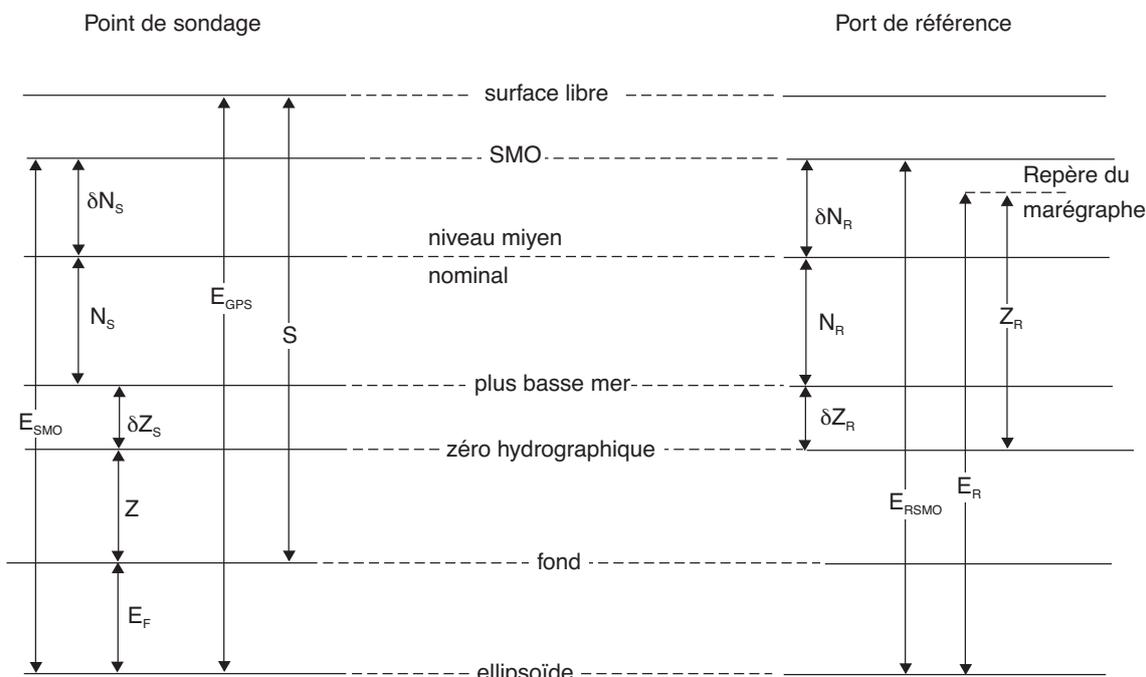


Figure 5 : Correction de sonde, technique spatiale.

E_R = cote ellipsoïdale du repère du marégraphe,
 Z_R = cote hydrographique du repère du marégraphe.

Le problème consiste à déterminer E_F la cote ellipsoïdale du fond (c'est une des recommandations de l'OHI)⁴, ainsi que Z la cote hydrographique du fond.

En s'aidant de la figure 5, on obtient sans difficulté les résultats suivants :

$$E_F = E_{GPS} - S$$

$$Z = E_{SMO} - E_F - (\delta Z_S + N_S + \delta N_S)$$

E_{GPS} , S et E_{SMO} sont issus de mesures. La figure 6 donne un exemple des valeurs de E_{SMO} au voisinage des côtes de France, obtenues à l'aide des mesures altimétriques de TOPEX/POSEIDON.

Soulignons un avantage essentiel de cette méthode : la cote de la surface libre dans un repère terrestre ne figure pas (même implicitement) dans la formule précédente, ce qui élimine les problèmes liés à la prédiction de marée (sauf en ce qui concerne la détermination des plus basses mers et les mouvements du socle lorsqu'ils sont significatifs) et aux effets météorologiques et océanographiques.

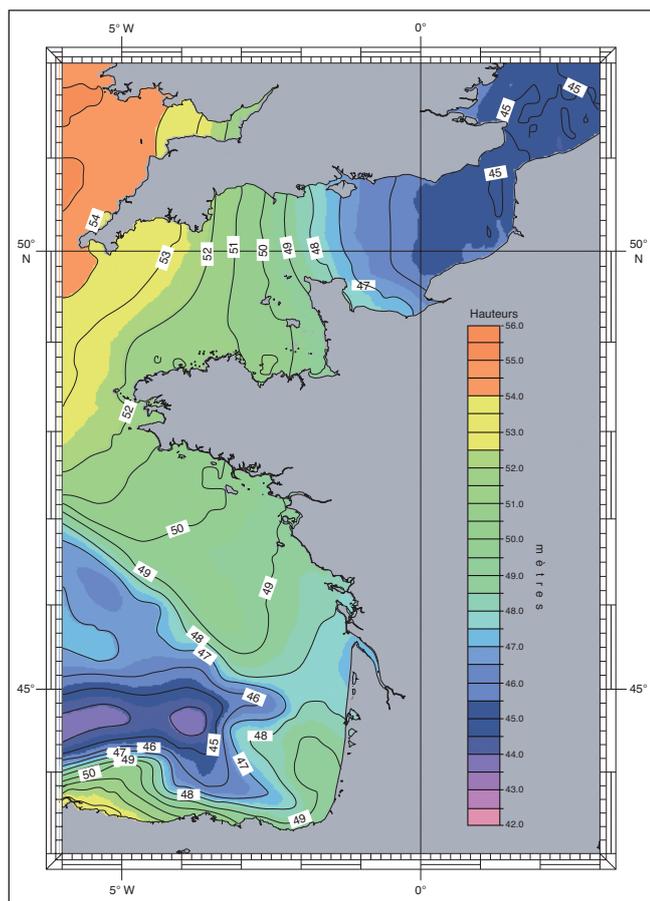


Figure 6 : Cote ellipsoïdale de la Surface Moyenne Océanique.

4 Résolution technique OHI A2.5, §4

Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, δZ_S est issu de la relation suivante :

$$\delta Z_S = \delta Z_R \frac{N_S}{N_R}$$

N_S et N_R sont obtenus à l'aide des constantes harmoniques issues des modèles de marée au large et des observations au port de référence. La figure 3 en donne une illustration pour la Manche.

δN_S est la différence entre le niveau moyen nominal et le niveau de la SMO au point de sondage. Suivant l'approximation du parallélisme des surfaces des niveaux moyens, on pose $\delta N_S = \delta N_R$ où δN_R est, au port de référence, l'écart entre le niveau moyen calculé à partir des observations couvrant la période ayant servi à définir la surface moyenne océanique (SMO), et le niveau moyen nominal. Tous les éléments la formule de calcul de Z sont ainsi disponibles.

Il subsiste cependant une difficulté, due à l'imprécision des mesures altimétriques à l'approche des côtes, mais les mesures géodésiques de précision effectuées dans les observatoires de marée peuvent fournir une aide pour y remédier en fournissant une possibilité d'interpolation. Par exemple, à cause de cette imprécision, la cote ellipsoïdale E_{RSMO} de la SMO au port de référence ne peut pas provenir des mesures altimétriques, mais la cote ellipsoïdale E_R du repère du marégraphe peut être obtenue à l'aide de mesures géodésiques effectuées sur le site de l'observatoire, ce qui permet d'appliquer la formule suivante :

$$E_{RSMO} = E_R - Z_R + \delta Z_R + N_R + \delta N_R$$

4. STABILITÉ

La notion de stabilité d'un repère, nécessite la réponse à la question suivante : stabilité par rapport à quoi ? Cela dépend généralement du problème à résoudre : pour l'hydrographie, le critère de stabilité est tel que les valeurs des sondes ne puissent pas être remises en cause par des réalisations successives de la référence. Cela concerne notamment la stabilité de repères matériels dont la cote par rapport au zéro hydrographique est déterminée avec précision.

Nous avons vu précédemment qu'une excellente précision dans le positionnement du niveau des plus basses mers n'est pas requise, mais une fois fixée, la cote du zéro hydrographique définit celui-ci très précisément et, sauf accident exceptionnel, définitivement, indépendamment d'une détermination ultérieure éventuellement plus précise du niveau des plus basses mers. Il est important qu'une cartographie pérenne en soit établie afin d'éviter des déterminations successives. Or, dans l'intention paraissant a priori très louable d'améliorer la précision, cette règle de stabilité est souvent transgressée.

Bien que cela soit rendu possible grâce aux constantes harmoniques, en raison de la stabilité recherchée de la référence, le niveau des plus basses mers astronomiques ne devrait pas être calculé à l'occasion de nouvelles observations, mais de préférence être issu d'une cartographie globale permanente. Cependant, à cause du manque de confiance dans la qualité des modèles, et surtout du sentiment que cette qualité évolue rapidement avec les progrès des moyens de calcul, cette règle est rarement respectée.

En outre, il se pose la question de la compatibilité avec les pays riverains. L'idéal serait qu'un modèle commun soit adopté, mais des tentatives en ce sens au sein du « Tidal Working Group » de la Commission Hydrographique de la Mer du Nord, ont montré que cela présentait beaucoup de difficultés. Il faudra probablement se contenter pour le court et moyen terme, d'une sorte d'ajustement aux frontières des zones de responsabilité.

Cette cartographie du niveau des plus basses mers astronomiques est réalisée par rapport au niveau moyen du modèle, dont on a vu que la cote influait peu, dans les limites des valeurs réalistes, sur les constantes harmoniques (qui servent à calculer le niveau des plus basses mers astronomiques).

4.1 Méthodes traditionnelles

Le niveau moyen nominal a acquis, au cours des procédures de positionnement du zéro hydrographique selon les techniques traditionnelles, le statut de référence verticale. Son accessibilité au large est assurée par l'intermédiaire d'un modèle qui permet de calculer sa cote par rapport à la surface libre au lieu et à l'instant du sondage (en supposant δh constant dans l'espace à l'instant du sondage).

La question de la stabilité du niveau moyen nominal, choisi comme référence verticale, ne se pose pas en termes de précision de sa cotation par rapport à la surface libre (qui se traduit en fait par une incertitude sur les sondes réduites), mais en termes de pertinence du choix de cette surface de référence pour résoudre le problème de réduction des sondages. Remarquons d'abord que, pour les observatoires côtiers, la référence verticale est matérialisée par les repères du marégraphe. Ce choix est pertinent car leurs mouvements verticaux éventuels devraient être proches de ceux affectant les zones côtières voisines. C'est le cas également pour le niveau moyen nominal, dont la cote par rapport à des repères côtiers est fixe.

Remarquons cependant que, en raison des procédures de réduction, les mouvements verticaux éventuels du marégraphe ont une incidence sur la stabilité de la référence verticale pour les points éloignés où les mouvements verticaux du socle terrestre peuvent ne pas être identiques à ceux du marégraphe. Ce problème ne peut être résolu correctement que par la prise en compte du positionnement géodésique de marégraphes côtiers entourant la zone de sondage et par la modélisation des éventuels mouvements, au large comme à terre. Enfin, dans l'utilisation des marégraphes immergés, une difficulté autre relative à la stabilité provient d'une possible évolution lente, non décelée pendant la période des mesures, de la pente moyenne du plan d'eau entre la zone du sondage et le port de référence. Les systèmes futurs (faisant suite aux recherches en cours) de modélisation côtière des effets (couplés) météorologiques et océanographiques devraient permettre de quantifier cette pente.

Il n'est ici question que de la correction des sondages hydrographiques, mais il faut garder à l'esprit que le but final est le besoin du navigateur qui n'a le plus souvent à sa disposition qu'une prédiction de marée rapportée au niveau moyen nominal et non au niveau moyen instantané. La « correction de baromètre inverse » préconisée dans les annuaires des marées permet d'améliorer la précision, mais il serait préférable de disposer de la valeur de δh (écart entre le niveau moyen instantané et le niveau moyen nominal) mesurée au marégraphe, ce que pratiquent les services de pilotage de certains ports.

4.2 Techniques spatiales

Concernant les références issues des techniques spatiales, il a été montré plus haut, à propos des ellipsoïdes de référence, que les critères de stabilité et de précision amènent à préférer l'ITRS au WGS 84. Pour positionner le zéro hydrographique, il est encore nécessaire de recourir à un niveau moyen nominal, local (et étendu par l'intermédiaire de la SMO, traduite pour s'ajuster au niveau moyen nominal au port de référence) tant que les zones de marée actuelles seront en vigueur, SMO (établie sur une longue période « bien choisie ») lorsque l'on évoluera vers un zéro hydrographique continu généralisé. Mais le niveau moyen nominal perd alors son statut de référence, car après qu'on l'aura utilisé pour situer dans le repère « ellipsoïdal » le niveau des plus basses mers, celui-ci acquiert le statut de zéro hydrographique dont la cote ellipsoïdale peut être fixée définitivement, ce qui résout le problème de la stabilité de la référence. Mais la question de la pertinence du choix de la référence ellipsoïdale se pose, car à la différence du niveau moyen nominal, qui s'appuie sur les repères côtiers, l'ellipsoïde est indépendant des mouvements verticaux des repères terrestres qui, s'ils existent, peuvent induire des variations des valeurs des sondes. L'utilisation de cette technique doit s'accompagner, si nécessaire, d'une surveillance géodésique des mouvements verticaux des repères des marégraphes proches (qui doit être prise en compte dans les diverses réalisations de l'ITRS) et de la modélisation des mouvements du socle.

5. CONCLUSION, RECOMMANDATIONS POUR L'UTILISATION DES MODÈLES

Les difficultés essentielles liées à la réduction des sondages hydrographiques apparaissent dès que l'on s'éloigne des stations marégraphiques côtières. Le recours à la modélisation de la marée est alors nécessaire. Le rôle principal de la modélisation est de localiser le zéro hydrographique dans un référentiel lié à la terre. Cette référence étant fixée, d'autres techniques peuvent être utilisées pour déterminer les hauteurs d'eau, par exemple le GPS cinématique (et ses éphémérides précises) ou un autre modèle plus spécifique.

A proximité des marégraphes, la cote du zéro hydrographique par rapport à des repères de nivellement est rarement remise en cause, même après un positionnement éventuellement plus précis du niveau des plus basses mers. Cela évite d'ajouter à l'incertitude sur la hauteur d'eau (rapportée aux repères terrestres), l'incertitude sur la position du zéro. Au large, selon la technique mise en œuvre, le niveau moyen nominal ou l'ellipsoïde constituent les références fondamentales. Pour la même raison que celle qui conduit à fixer la cote du zéro hydrographique des stations côtières, il est souhaitable que la cote du zéro par rapport à ces références soit fixée définitivement. En fait, ce sont les performances actuelles des modèles numériques qui amènent à poser le problème de cette façon en permettant de situer le niveau des plus basses mers avec une précision suffisante pour définir ainsi le zéro hydrographique. De ce fait, la question se pose de savoir quelles sont les performances requises pour qu'un modèle puisse être utilisé dans ce but. La localisation du zéro hydrographique dépend évidemment

de sa définition, normalement le niveau des plus basses mers astronomiques. Deux options sont envisageables :

- soit le modèle fournit les niveaux de basses mers pour diverses situations de vives eaux et le niveau des plus basses mers est déduit par extrapolation,
- soit le modèle fournit des constantes harmoniques permettant de calculer le niveau de la plus basse mer extrême.

Ces deux solutions ne sont pas équivalentes, car pour la première, le niveau des plus basses mers est rapporté au niveau de référence du modèle, un géoïde s'il s'agit d'un modèle mathématique, tandis que pour la seconde, la référence est celle de la formule harmonique, le niveau moyen. Comme indiqué au §1.4, « les variations des constantes harmoniques en fonction des variations du niveau moyen sont négligeables dans la pratique ». Cette observation permet de ne pas retenir une détermination précise du niveau moyen.

La seconde solution est la seule praticable aujourd'hui, car il est parfois hasardeux de recourir à des extrapolations, le géoïde marin n'est pas connu très précisément et les effets météorologiques et océanographiques ne sont pas encore modélisés avec une précision suffisante.

Pour la réduction par la méthode traditionnelle, on n'a d'ailleurs pas besoin de la position précise du niveau moyen « vrai » et pour la méthode spatiale on peut se fonder sur des mesures absolues de la SMO (avec problèmes d'interpolation près des côtes, que la modélisation des effets météorologiques et océanographiques permettra de mieux résoudre tout en permettant de mieux valider la SMO).

L'expérience acquise pour la modélisation de la marée en Manche apporte des informations sur ce qu'il a été possible d'obtenir à l'aide de ces techniques :

- la simulation d'une année de marée permet de calculer les constantes harmoniques d'une liste standard en chacun des 25 000 points du modèle (environ).

- ces constantes sont corrigées afin de correspondre au mieux à celles qui sont déjà connues, en fonction de leur degré de confiance.

- le calcul des plus basses mers astronomiques est effectué à l'aide de la méthode harmonique en chacun des points de maillage du modèle.

Cette technique permet d'atteindre une précision voisine de 1 % du marnage. Cet ordre de grandeur semble raisonnable et devrait pouvoir être adopté comme norme, corrélativement à la règle suivante : si le niveau des plus basses mers ne peut pas être déterminé à mieux que N cm (valeur typique : 10 cm), le zéro hydrographique sera abaissé à un niveau tel que, compte tenu de l'incertitude sur sa détermination, le niveau des plus basses mers astronomiques ne puisse pas lui être inférieur. Sur les côtes de France métropolitaine, le niveau moyen a tendance à monter, ce qui permet de ne pas prendre de marge de sécurité supplémentaire.

MODÉLISATION CÔTIÈRE APPLIQUÉE AUX PRÉDICTIONS DE MARÉE POUR LA RÉDUCTION DES SONDAGES HYDROGRAPHIQUES

Lucia Pineau-Guillou, ingénieur sur contrat

RÉSUMÉ

Pour rapporter les sondes des levés au zéro hydrographique, il est indispensable de disposer de prédictions de marée précises. Les modèles de marée¹ du SHOM sont généralement mis en place à partir de l'interpolation des mesures existantes.

Cependant, dans le Golfe du Morbihan, la marée est complexe, en particulier le marnage varie très rapidement au niveau des îles, dans les zones de forts courants. La densité des mesures n'est pas suffisante pour représenter finement ces fortes variations.

Un modèle hydrodynamique a été mis en place sur cette zone à l'aide du logiciel TELEMAC-2D développé par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) d'EDF et commercialisé par SOGREAH. Ce modèle présente une erreur moyenne en amplitude de 5 cm, et un déphasage moyen inférieur à 9 minutes. Il a permis de mettre en place un modèle de marée grâce à l'analyse des hauteurs d'eau calculées. Ce modèle de marée a ensuite été ajusté aux mesures.

Le modèle de marée ainsi obtenu est de meilleure qualité que celui issu d'une simple interpolation des mesures : la densité des points permet d'obtenir les forts gradients de l'amplitude de la marée. L'erreur moyenne en amplitude est de 2,7 cm (écart-type de 1,7 cm).

ABSTRACT

Coastal modelling for tidal prediction to reduce hydrographic surveys

To reduce soundings to chart datum, precise tidal predictions are necessary. Tidal models at SHOM are generally set up from interpolation of measurements.

However, in Golfe du Morbihan, tide is complex, particularly tidal range varies very quickly around islands, where tidal streams are very strong. Measurements density does not allow a good representation of these variations.

A hydrodynamical model has been set up with TELEMAC-2D software from Laboratoire National d'Hydraulique et d'Environnement (LNHE) of Electricité de France (EDF). The mean amplitude error of this model equals 5 cm, the mean phase difference is lower than 9 minutes. From this hydrodynamic model, a tidal model has been set up using analysis of calculated water levels. Afterwards, this tidal model has been adjusted to measurements.

This tidal model provides better results than the model issued from measurements interpolation : grid points density allow to reproduce strong tidal range gradients. The mean error of this model equals 2,7 cm (standard deviation 1,7 cm).

¹ Modèle de marée du SHOM : fichier contenant pour chaque point d'une grille régulière les coordonnées géographiques du point et les valeurs des 143 composantes harmoniques (amplitude et phase) de la liste standard du SHOM

1. INTRODUCTION

Les modèles de marée du SHOM permettent de prédire la marée en tout point d'une zone géographique, pour réduire des sondages. Il s'agit d'une grille régulière. En chaque point de la grille, les amplitudes et phases des 143 composantes harmoniques de la liste standard du SHOM sont fournies. Ces modèles sont mis en place à partir de l'interpolation des constantes harmoniques issues de l'analyse des mesures de marée du SHOM. L'interpolation se fait par la méthode de la plaque mince (cf. [12]).

Pour le Golfe du Morbihan, 21 sites de mesures sont disponibles. Il s'est avéré que l'interpolation des mesures entre ces sites n'est pas suffisante pour représenter correctement la marée.

2. MODÈLE DE MARÉE INITIAL DU GOLFE DU MORBIHAN

2.1 Présentation de la zone

Le Golfe du Morbihan se situe en Bretagne Sud, il est présenté Figure 1. Il s'étend de 3°W à 2°40'W et de 47°30'N à 47°40'N. Port-Navalo se situe à l'entrée du Golfe. De nombreuses îles sont parsemées dans le Golfe, les principales étant l'île aux Moines et l'île d'Arz. Les fonds sont faibles : ils sont inférieurs à 30 mètres, et même généralement inférieurs à une dizaine de mètres à l'Est de l'île d'Arz.

La marée dans cette zone est de type semi-diurne, elle est particulièrement complexe du fait de la morphologie du site. L'amplitude de la marée est de l'ordre de 3 mètres à l'extérieur du Golfe puis elle diminue en se propageant dans le Golfe pour atteindre seulement 1,7 mètres à l'Est du Golfe, au niveau du Passage. Les passages étroits entre les nombreuses îles entraînent de très forts courants, qui peuvent atteindre 8 nœuds au niveau des resserrements en période de vive-eau moyenne (cf. [10] et [11]). Dans les zones de forts courants, l'amplitude de la marée varie rapidement créant ainsi des « marches d'escalier » : les variations d'amplitude peuvent atteindre 30 cm sur quelques centaines de mètres.

2.2 Mesures de marée disponibles

La localisation des 21 séries de mesures disponibles dans le Golfe du Morbihan est présentée Figure 2. Le SHOM dispose au Crouesty d'un Marégraphe Côtier Numérique permanent. Les autres observatoires (non permanents) ont été installés entre 1983 et 2005, pour une durée variant généralement de 1 à 2 mois. Ces mesures de marée sont analysées par les logiciels du SHOM, pour en déduire les constantes harmoniques en chaque observatoire ; l'analyse est faite par concordance par espèce (cf. [1] et [2]). Le modèle de marée est mis en place par un logiciel du SHOM qui permet de calculer sur une grille régulière les constantes harmoniques par interpolation de celles issues des mesures.

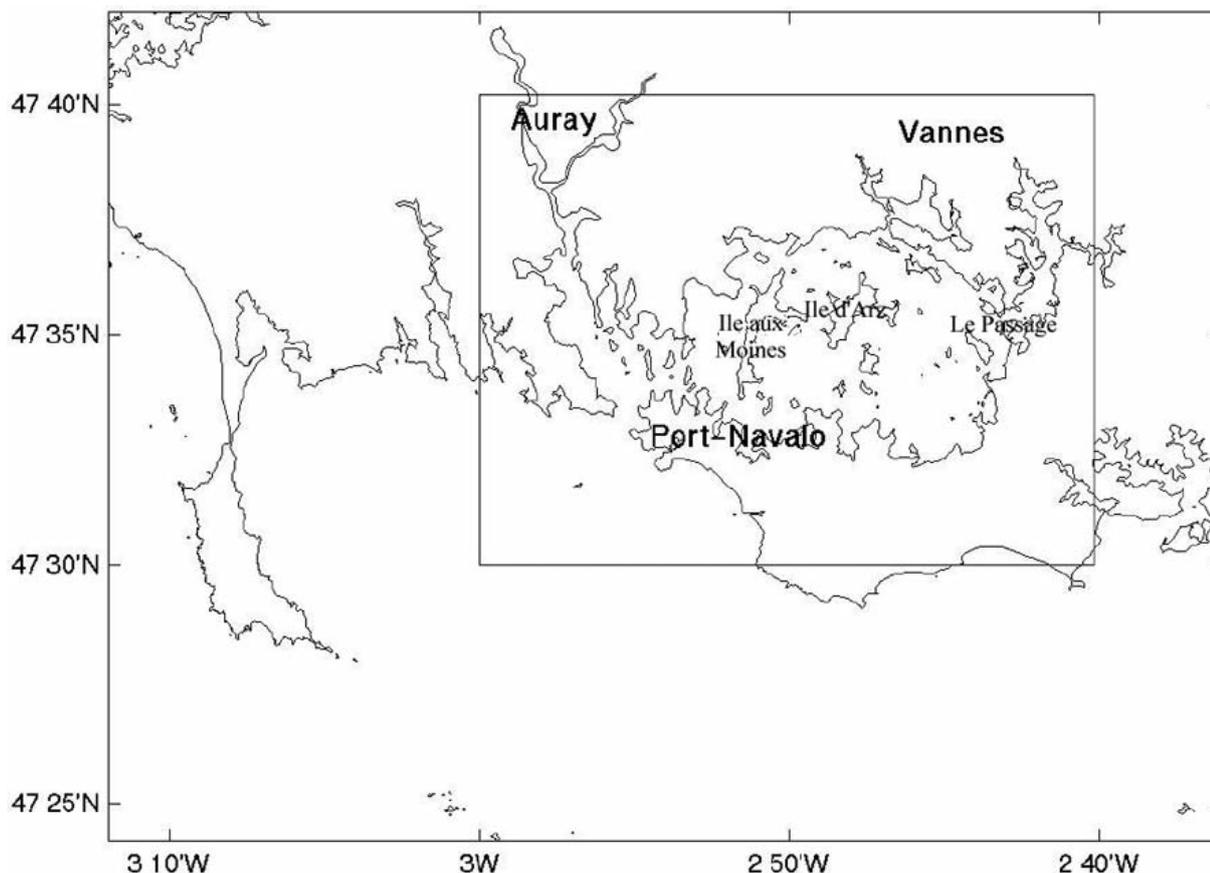


Figure 1 : Présentation du Golfe du Morbihan.

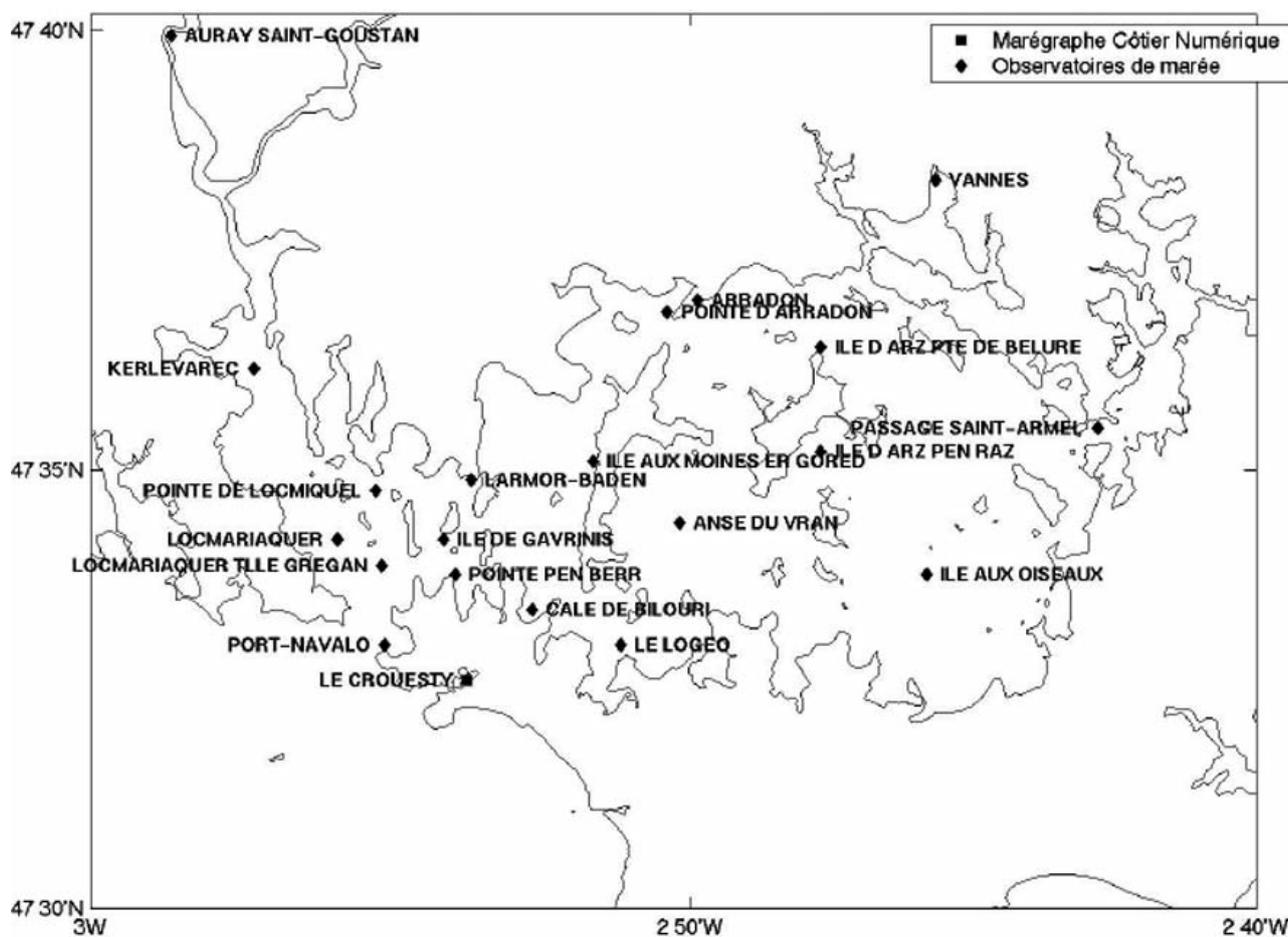


Figure 2 : Mesures de marée disponibles dans le Golfe du Morbihan.

2.3 Modèle de marée initial (issu des mesures)

Le modèle de marée initial du Golfe du Morbihan est issu de l'interpolation des 21 séries de mesures disponibles (cf. [1] et [2]). Il fournit sur une grille régulière les amplitudes et phases de 143 constantes harmoniques (liste standard du SHOM). Les amplitudes issues de ce modèle sont présentées Figure 3. Les courbes isoamplitudes sont représentées tous les 10 cm. L'amplitude de la marée est divisée par 2 à l'intérieur du Golfe : elle varie de 300 cm à l'extérieur du Golfe à 160 cm dans le Golfe. Au niveau de l'île Longue, à l'entrée du Golfe, l'amplitude de la marée varie de 260 à 230 cm, mais cette variation est progressive. De même, au niveau des îles Berder et de l'île de la Jument, elle varie de 200 à 170 cm de manière très progressive.

En réalité, au niveau de ces îles, les forts courants entraînent une variation importante de l'amplitude de la marée avec la présence de « marches d'escalier ». Malgré le nombre important de mesures, leur densité n'est pas suffisante pour bien représenter ce gradient d'amplitude. Un modèle hydrodynamique est alors développé. L'objectif

est d'exploiter les hauteurs d'eau issues du modèle hydrodynamique pour retrouver les forts gradients au niveau des îles.

3 MODÈLE HYDRODYNAMIQUE DU GOLFE DU MORBIHAN

3.1 Mise en place du modèle hydrodynamique

Le modèle hydrodynamique est mis en place à partir du logiciel TELEMAC-2D développé par le Laboratoire National d'Hydraulique et d'Environnement (LNHE) de EDF et commercialisé par SOGREAH (cf. [5] [6] [7] [8] et [9]). Ce code bidimensionnel résout les équations de Saint-Venant, et permet de calculer les hauteurs d'eau et les courants. Il est utilisé au SHOM depuis 1996 pour l'élaboration des atlas de courants de marée (cf. [4]).

Le maillage est aux éléments finis, la taille de maille varie de 80 m dans les rivières et 100 m près des îles à 500 m aux limites du modèle. Le maillage contient 17 660 nœuds, il est présenté Figure 4.

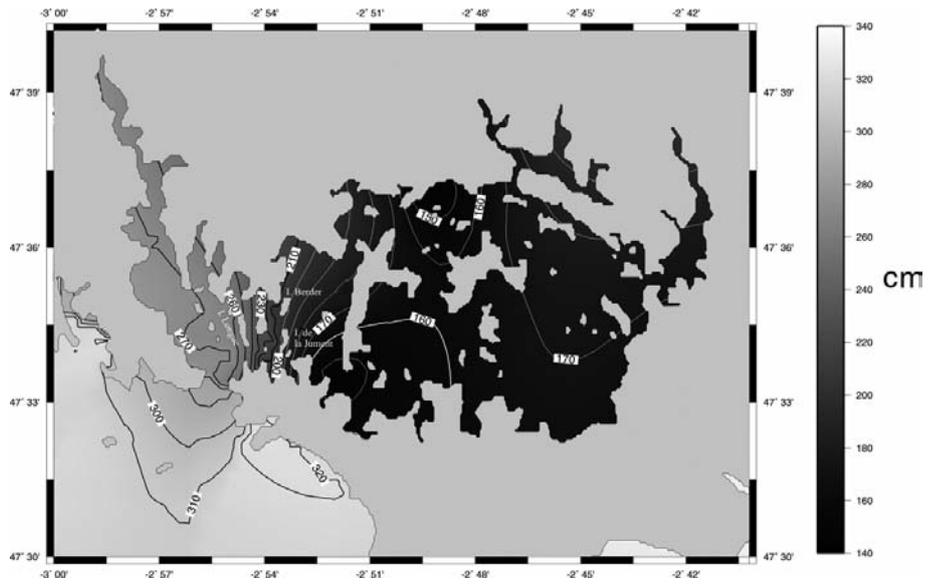


Figure 3 : Amplitudes du modèle de marée issu des mesures.

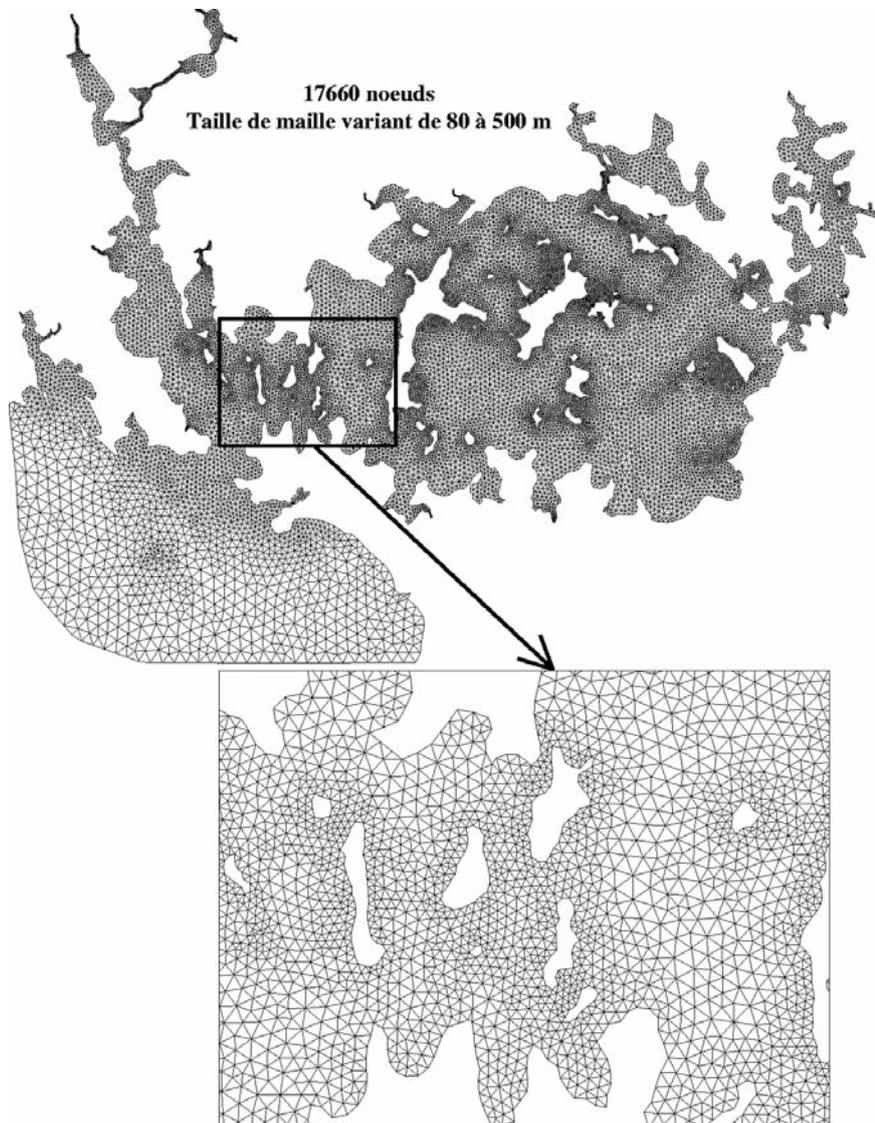


Figure 4 : Maillage du modèle du Golfe du Morbihan.

La bathymétrie est issue des cartes marines du SHOM et de la Base de Données Bathymétriques du SHOM. Plus de 100 000 sondes sont disponibles. Le trait de côte est issu de la carte marine 7034 du Golfe du Morbihan. Le zéro du modèle est un géoïde (surface équipotentielle du champ de gravité) « parallèle » à l'IGN69 passant par le niveau moyen aux limites du modèle. Les sondes sont donc corrigées pour se rapporter à l'IGN69, puis elles sont corrigées de la cote du niveau moyen par rapport à l'IGN69 à Port-Navalo (point le plus proche des limites dont on connaît la cote du niveau moyen) soit 36,5 cm.

Deux simulations sont réalisées : une première sur 2 jours pour ajuster et valider le modèle hydrodynamique, une deuxième sur 30 jours pour calculer les constantes harmoniques à partir des hauteurs d'eau.

3.2 Validation du modèle hydrodynamique

La validation du modèle se fait aux 21 points de mesure dont la localisation est présentée Figure 2. La simulation Telemac porte sur une marée de vive-eau moyenne sur 2 jours, seul le dernier jour est exploité, le premier servant à initialiser le modèle. Les hauteurs d'eau issues du modèle sont comparées aux prédictions issues de l'analyse harmonique des mesures de marée. Cette comparaison permet de caler les paramètres du modèle (principalement le coefficient de frottement) pour que les hauteurs issues du modèle soient le plus proche possible des prédictions (c'est-à-dire indirectement des mesures). La Figure 5 souligne l'importance du calage du modèle. La différence moyenne d'amplitude entre le modèle et les prédictions est de 22,8 cm pour le modèle non calé et de 4,2 cm pour le modèle calé sur l'ensemble des 21 sites. L'influence des paramètres numériques (pas de temps, schéma numérique, solveur, type de stockage des matrices...) ainsi que celle des paramètres physiques (modèle de turbulence, coefficient de frottement, origine de

la bathymétrie) ont été étudiés (cf. [3]). Ainsi, selon la valeur du coefficient de frottement, la différence d'amplitude moyenne varie de 3,4 à 11,4 cm et le déphasage moyen de 5 à 13 minutes.

Les comparaisons aux 21 points de mesures sont globalement satisfaisantes. La différence d'amplitude moyenne entre le modèle et les mesures est de 4,2 cm avec un écart-type de 2 cm. Le déphasage moyen est de 5 minutes à la pleine mer (écart-type de 3 minutes) et de 9 minutes à la basse mer (écart-type de 5 minutes). Ces déphasages ne sont pas très satisfaisants et s'expliquent probablement en partie par le manque de données bathymétriques, une grande partie des estrans n'étant pas décrite. La bathymétrie du Golfe du Morbihan a été entièrement refaite en 2005 (sondeurs multi-faisceaux et levés lasers aéroportés pour les petits fonds et les zones découvrantes), cette nouvelle bathymétrie devra être intégrée au modèle courant 2006 pour étudier les améliorations apportées.

4. MODÈLE DE MARÉE FINAL DU GOLFE DU MORBIHAN

4.1 Modèle de marée issu de Telemac

Une simulation est effectuée sur 30 jours. Les hauteurs d'eau calculées sont interpolées sur une grille régulière de pas 90 m. Elles sont ensuite analysées par concordance par espèces avec Port-Navalo (cf. [13] et [14]) pour en déduire un modèle de marée du Golfe du Morbihan. Les zones découvrantes ne sont pas traitées : elles sont modélisées par Telemac, mais le logiciel d'analyse des hauteurs d'eau utilisé en post-traitement ne permet pas de calculer les constantes harmoniques à partir de hauteurs d'eau « tronquées ».

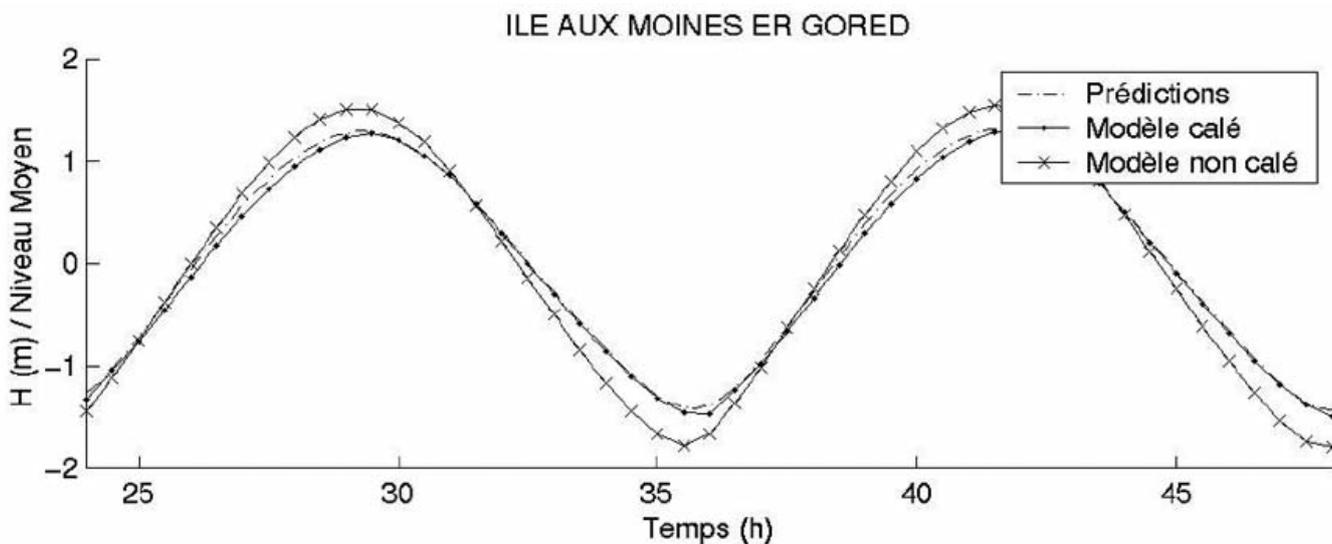


Figure 5 : Comparaison entre les hauteurs d'eau prédites (à partir des mesures) et celles calculées par Telemac pour le modèle calé et non calé.

4.2 Ajustement aux mesures

L'ajustement avec les mesures a pour but de conserver les zones de forts gradients d'amplitude tout en corrigeant la différence d'amplitude et le déphasage du modèle. Le principe est de calculer pour chaque point de mesure les amplitudes et phases des 143 constantes harmoniques à partir des mesures et du modèle. Les coefficients d'ajustement sont le rapport complexe entre les mesures et le modèle :

$$\left\{ \begin{array}{l} aj(j,k) = \frac{am(j,k)}{a(j,k)} e^{i(phm(j,k)-ph(j,k))} \\ j = 1, n \\ k = 1, 143 \end{array} \right.$$

avec :

- n le nombre de points de mesures,
- am(j,k), phm(j,k) : au point j, l'amplitude et la phase de l'onde k issues du modèle,
- a(j,k), ph(j,k) : au point j, l'amplitude et la phase de l'onde k issues de la mesure.

Ensuite, en chaque point de grille du modèle de marée issu de Telemac, on calcule le coefficient d'ajustement interpolé par la méthode de la plaque mince, puis on en déduit l'amplitude et la phase du modèle ajusté en multipliant les amplitudes et phases du modèle par le coefficient d'ajustement :

$$\left\{ \begin{array}{l} mod(k) = ampl(k) e^{i \cdot phase(k)} \\ mod_aj(k) = mod(k) * coef_aj(k) \\ ampl_aj(k) = Re(mod_aj(k)) \\ phase_aj(k) = Im(mod_aj(k)) \\ k = 1, 143 \end{array} \right.$$

avec pour chaque point de grille et pour chaque onde k :

- ampl(k), phase(k) : l'amplitude et la phase du modèle,
- mod(k) : la représentation complexe de l'amplitude et la phase du modèle,
- coef_aj(k) : le coefficient d'ajustement complexe (interpolation au point de grille des coefficients aj(j,k) j=1,n),
- mod_aj(k) : la représentation complexe de l'amplitude et la phase du modèle ajusté,
- ampl_aj(k), phase_aj(k) : l'amplitude et la phase du modèle ajusté.

Lorsque l'on est à l'intérieur du Golfe, les points à l'extérieur du Golfe ne sont pas pris en compte et vice-versa.

Certains post-traitements ont été effectués sur le modèle obtenu pour les raisons suivantes :

- le niveau de référence du modèle de marée est un géoïde parallèle à l'IGN69, or le programme de réduction des sondes nécessite que la référence soit le niveau des plus basses mers,

- la grille ne couvre pas les bancs découvrants, les valeurs des constantes sont donc extrapolées,
- pour certaines applications, il est nécessaire d'inclure dans le modèle de marée le niveau des plus hautes mers ; il est donc calculé.

4.3 Modèle de marée issu de Telemac ajusté aux mesures

Le modèle final **cstMORBIHAN** s'étend de 47,5 à 47,7 degrés N et 2,65 à 3 degrés W. Il s'agit d'une grille 200*155 points, de pas d'espace 0,078 minutes de latitude et 0,105 minutes de longitude, soit approximativement 200 m en latitude et longitude. Les amplitudes et phases du modèle sont calculées pour 143 composantes harmoniques ; elles ont été visualisées sous la forme de surfaces colorées et validées par comparaison aux mesures (cf. [3]) pour 16 d'entre elles :

- le niveau moyen,
- les longues périodes MM et MSF,
- les diurnes Q1 O1 P1 et K1,
- les semi-diurnes MU2 N2 M2 S2 K2 et L2,
- les quart-diurnes M4,
- les sixième-diurnes M6,
- les huitième-diurnes 3MS8.

16 composantes représentatives de la marée sur 143 ont été étudiées, les autres ayant un comportement similaire. La visualisation des ces ondes et la comparaison avec les mesures sont détaillées dans le rapport d'étude du Golfe du Morbihan (cf. [3]). Seule la première constante, le niveau moyen rapporté au niveau des plus basses mers (amplitude de la marée), est présentée ici.

Les amplitudes issues du modèle de marée sont présentées Figure 6. Les courbes isoamplitudes sont tracées tous les 10 cm. Cette figure est à comparer au modèle de marée issu des mesures présenté Figure 5. Les courbes isoamplitudes sont nettement plus resserrées au niveau des îles : la densité des points de calcul permet de représenter les « marches d'escalier » au niveau des zones de forts courants. Au niveau de l'île Longue, le niveau moyen varie de 270 à 230 cm de part et d'autre de l'île, soit une variation de 40 cm en moins de 400 m. Au niveau de l'île Berder et l'île de la Jument, il varie de 200 à 170 cm très rapidement, soit une variation de 30 cm sur également moins de 400 m. Au contraire, pour le modèle issu des mesures, la variation est nettement plus progressive : au niveau de l'île Berder et de l'île de la Jument, la variation de 30 cm (200 à 170 cm) s'effectue progressivement sur environ 2 kilomètres.

Le modèle de marée final a été testé. En chacun des 21 points de mesures, une prédiction est réalisée à partir du modèle et à partir des mesures toutes les 15 minutes en mars 2005. La moyenne spatiale des écarts moyens est de 2,7 cm (écart-type de 1,7 cm), la moyenne spatiale des écarts maximums est de 8,7 cm. L'écart maximum est de 12,2 cm à Pointe de Locmiquel.

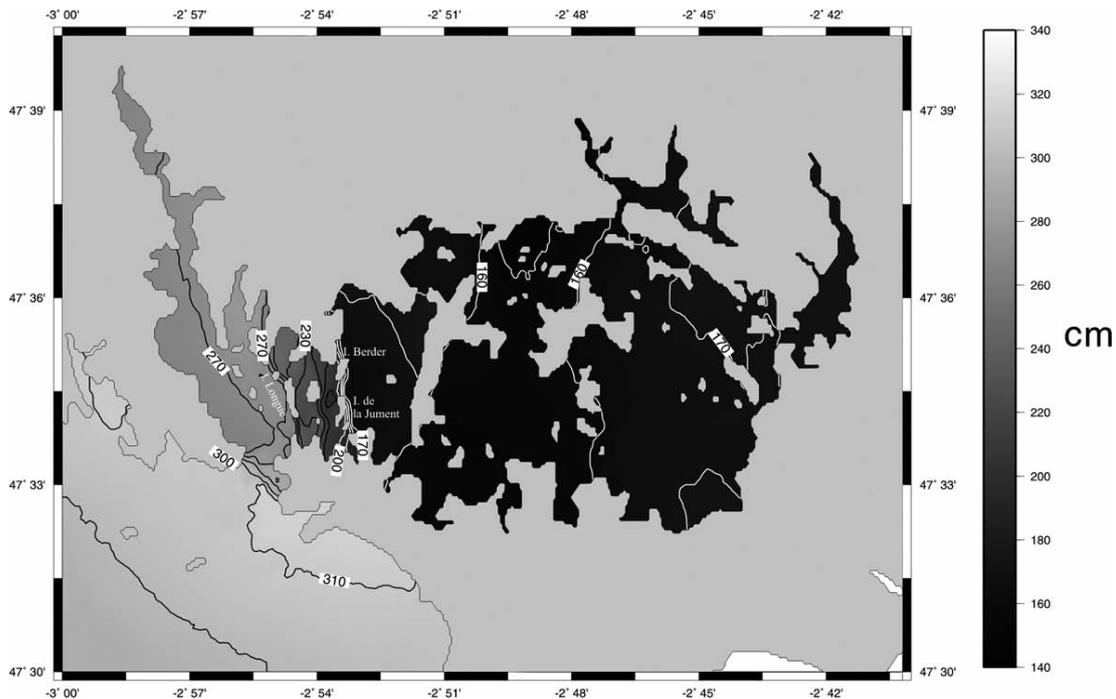


Figure 6 : Amplitudes du modèle de marée issu de Telemac et ajusté aux mesures.

5. AMÉLIORATION DES PRÉDICTIONS DE MARÉE

Les prédictions en un point situé à environ 600 m à l'Est de l'île Berder ont été effectuées à partir des deux modèles de marée : le modèle initial issu des mesures, le nouveau modèle issu de Telemac et ajusté aux mesures **csMORBIHAN**. Le point a pour coordonnées 47°34,8'N 2°53,1'W. En ce point, l'amplitude issue du modèle initial est de 194 cm et celle du nouveau modèle de 162 cm. Les prédictions ont été réalisées à partir des deux modèles au mois de mars 2005 (coefficient de marée important de 110), les hauteurs ont été calculées toutes les 15 minutes. La comparaison de ces deux prédictions est présentée Figure 7. La différence de niveau moyen (en pointillés sur le graphe) est de 32 cm mais la différence de hauteurs peut dépasser les 60 cm en pleine mer. La différence entre les deux prédictions est présentée Figure 8. Les écarts varient de -40 cm à 100 cm. Ils sont d'autant plus importants en période de vive-eau (double par rapport à la période de morte-eau) et aux instants de pleine mer. A cause du déphasage en temps, l'écart peut atteindre plus de 90 cm et il est en moyenne de 40 cm.

Localement, à l'Est de l'île Berder, c'est donc une erreur moyenne de 40 cm qui aurait été faite sur la valeur calculée de la sonde, après réduction d'un sondage bathymétrique utilisant un modèle de marée issu uniquement de l'interpolation des mesures.

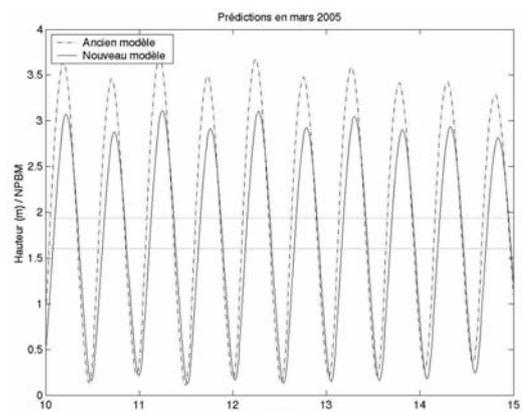


Figure 7 : Comparaison des hauteurs d'eau prédites à partir du modèle de marée initial (issu des mesures) et du nouveau (issu de Telemac et ajusté aux mesures).

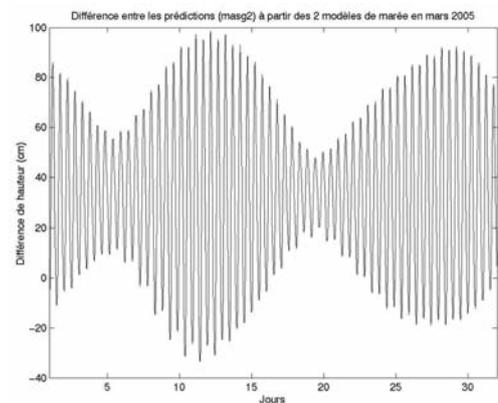


Figure 8 : Différence entre les prédictions à partir du modèle de marée initial (issu des mesures) et du nouveau (issu de Telemac et ajusté aux mesures).

6. CONCLUSION

La mise en place d'un modèle hydrodynamique a permis d'améliorer le modèle de marée du Golfe du Morbihan. Le modèle hydrodynamique présente une erreur moyenne de 4,2 cm en amplitude (écart-type de 2 cm), de 5 minutes en phase à la pleine mer (écart-type de 3 minutes) et de 9 minutes en phase à la basse mer (écart-type de 5 minutes).

Le modèle de marée final **cstMORBIHAN**² est issu du modèle hydrodynamique et ajusté aux mesures. Il s'étend de 47,5 à 47,7 degrés Nord et de 2,65 à 3 degrés Ouest, avec un pas d'espace de l'ordre de 200 m. Les comparaisons entre les amplitudes et phases du modèle de marée et les mesures sont satisfaisantes. L'intérêt du modèle numérique est de disposer d'une densité de points suffisante pour représenter les gradients importants (« marches d'escalier ») au niveau des zones de forts courants. L'interpolation à partir des mesures ne permet pas une précision satisfaisante, car leur densité n'est pas suffisante.

La modélisation numérique a permis d'améliorer la connaissance de la marée dans le Golfe du Morbihan. La technique d'ajustement du modèle par rapport aux mesures peut être renouvelée sur n'importe quelle zone géographique (à condition que suffisamment de données soient disponibles pour la mise en place et validation du modèle). En période de sondage bathymétrique, les mesures marégraphiques restent essentielles.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ronan Le Roy, Bernard Simon, « Réalisation d'un modèle de marée dans le Golfe du Morbihan - Première partie – Analyse harmonique des mesures disponibles, définition d'un zéro de réduction des sondes », SHOM, Rapport n°159 EPSHOM/CH/GG/NP du 2 juin 2004.
- [2] Ronan Le Roy, Bernard Simon, « Réalisation d'un modèle de marée dans le Golfe du Morbihan – Deuxième partie – Amélioration de modèle de marée à partir de nouveaux points de mesures », SHOM, Rapport n° 351 EPSHOM/CH/GG/NP du 6 décembre 2004.
- [3] Lucia Pineau-Guillou, « Réalisation d'un modèle de marée dans le Golfe du Morbihan - Modélisation hydrodynamique », Rapport d'étude n°001/05, Juillet 2005
- [4] Lucia Pineau-Guillou, « Courants de marée sur la côte Nord de Bretagne », Annales Hydrographiques, 6^e série, Vol. 1, n°770, 2000

- [5] EDF, SOGREAH, « Logiciel TELEMAR-2D Version 5.2 Manuel de l'utilisateur », Mars 2002
- [6] EDF, SOGREAH, « Logiciel TELEMAR-2D Version 5.2 Manuel de référence », Janvier 2002
- [7] EDF, SOGREAH, « Logiciel STBTM Version 4.1 Manuel de l'utilisateur », Février 1999
- [8] EDF, SOGREAH, « Logiciel STBTM Version 4.1 Manuel de référence », Février 1999
- [9] EDF, SOGREAH, « Logiciel MATISSE Version 1.0 Manuel de l'utilisateur »
- [10] Olivier Macur, « Etude des courants de marée dans le Golfe du Morbihan et à ces abords », Rapport HOCER pour le SHOM, Septembre 2000
- [11] SHOM, « Courants de marée Côte Sud de Bretagne », Ouvrage 558-UJA, 2005
- [12] Jean Duchon, « Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principe de la flexion des plaques minces », Revue Française d'Automatique Informatique Recherche Opérationnelle, Vol.10, n°12, Décembre 1976
- [13] Bernard Simon, « The species concordance method of tide prediction », SHOM, Rapport d'étude n° 9/89, Octobre 1989
- [14] Bernard Simon, « Cours de marée », 2004

² /usr/site/data/MAREE/MODELES_MAREE/cstMORBIHAN_12042005

ÉTUDE ET MODÉLISATION DE LA DYNAMIQUE DES DUNES SOUS-MARINES

Thierry GARLAN

RÉSUMÉ

La dynamique des dunes de sable sous-marines est un domaine qui touche plusieurs applications comme l'exploitation de granulats, le posé et la surveillance des câbles et pipe-lines, l'enfouissement des mines et épaves. Les services hydrographiques sont également concernés pour les aspects liés à la sécurité de la navigation. La connaissance de cette dynamique revêt donc des aspects économiques et de sécurité rendant ce sujet particulièrement sensible. L'étude des structures sableuses sous-marines a donné lieu à de nombreuses publications dans le cadre de travaux pilotes en partie par le SHOM (Garlan, 1990 ; Mallet, 1998 ; Ehrhold, 1999 ; Garnaud et al, 2000 ; Le Bot, 2001 ; Le Bot et al, 2000a, 2000b, 2001 ; Desmazes, 2001 ; Idier et al, 2002 ; Idier, 2002, 2003 ; Ehrhold et al, 2003). Ces études doivent permettre à terme, de disposer de modèles pour prévoir le déplacement de toute dune, sans devoir nécessairement faire appel à la comparaison de levés hydrographiques renouvelés sur de courtes périodes de temps. Il sera ainsi possible par de telles méthodes numériques d'améliorer la qualité des produits tout en limitant les jours de mer consacrés au suivi des dunes de sable.

Le présent article concerne les dunes sous-marines d'estuaire et de plate forme et repose essentiellement sur les résultats de thèses réalisées dans les Universités de Lille 1, Caen, Bordeaux 1 et Toulouse 3 et codirigées par le SHOM. Il prend également en compte les avancées les plus récentes présentées lors des deux workshops sur la dynamique des dunes co-organisés par le SHOM avec les universités de Lille (Trentesaux et Garlan, 2000) et de Twente aux Pays-Bas (Hulsher, Garlan et Idier, 2004).

ABSTRACT

Marine sand dunes dynamics are studied for several applications like extraction of granulates, monitoring of submarine cables and pipelines, burial of mines and wrecks. Hydrographic offices are also concerned to ensure safety of navigation. The knowledge of sand dunes movement have economic and security aspects which make this subject particularly significant for mariners. Underwater sandy structures have been described in many publications. Some of the corresponding research studies have been managed by the SHOM. These studies are carried out to progress the knowledge of sand dunes dynamics in the North Sea and to adapt the hydrographic surveys planning. They will help to develop prediction models of displacement of any dune in every environment and optimize the strategy of complementary hydrographic surveys.

We describe in this paper, the results of studies about marine and estuaries sand dunes realized, in cooperation with the SHOM, during some PhD of the Universities of Lille 1, Caen, Bordeaux 1 and Toulouse 3. We also take into account the most recent scientific progress reported during the workshops on the dynamics of sand dunes co-organized by the SHOM, with the university of Lille (Trentesaux and Garlan, 2000), and with the university of Twente in the Netherlands (Hulsher, Garlan and Idier, 2004).

1. INTRODUCTION

Les études des dunes et bancs de sable sous-marins ont été initiées par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine qui, dès le XIX^e siècle, mit en évidence des changements de la morphologie du fond sur les minutes bathymétriques, et effectua le renouvellement des levés sur les zones concernées. Les sédimentologues ont établi, depuis plusieurs décennies, les trois facteurs à l'origine de ces structures sédimentaires : la taille des grains, la quantité de matériaux mobilisables disponibles et l'hydrodynamisme engendré par la houle et les courants. Mais la prévision des déplacements des dunes sous-marines et de leur variabilité demeure souvent problématique.

En 1998, un profil effectué à l'aller et au retour d'une campagne en Mer du Nord par la Mission Hydrographique de l'Atlantique, a montré que si les déplacements des dunes de ce secteur sont, indétectables sur une semaine, et assez faibles sur 11 ans (quelques décimètres), les variations verticales sont très importantes : en une seule semaine la profondeur peut varier de un mètre, soit un écart de 15 % de la hauteur de la dune. Les écarts de profondeur proches, pour les deux échelles de temps, ont prouvé que la stratégie de surveillance décennale de telles dunes n'était pas optimale et qu'il était nécessaire, pour obtenir la sonde la plus haute, de se préoccuper des conditions ayant immédiatement précédé le levé.

2. LA DYNAMIQUE DES SÉDIMENTS

2.1. Rappel sur la mobilité des fonds

En étudiant le différentiel de profondeur obtenu avec plusieurs levés successifs, les hydrographes ont observé dès le XIX^e siècle les instabilités des fonds. Ces méthodes encore utilisées actuellement permettent de caractériser les évolutions passées (Garlan, 1994). Par exemple en Rade de Brest la comparaison des levés de 1867 et 1937 présente sur les secteurs rocheux stables un différentiel de ± 2 m caractérisant la fourchette des erreurs de mesures et d'interpolation. En dehors des secteurs rocheux la méthode met en évidence des secteurs où le remplissage sédimentaire et l'érosion peuvent localement dépasser 10 mètres en 70 ans (Le Faou, 2000). Ce genre d'étude repose sur plusieurs levés à haute résolution, suffisamment espacés dans le temps

et dont la localisation est suffisamment précise. Elles prouvent l'importance des volumes sédimentaires mis en mouvement, qui engendrent des modifications de la morphologie sous-marine et influent par conséquent sur la circulation des masses d'eau. Si cette méthode de différentiel bathymétrique permet de caractériser les volumes de sédiments déposés et/ou érodés, la quantité de sédiments réellement transportés dans le système durant cette période demeure inconnue.

La méthode différentielle est de plus en plus utilisée pour l'étude de l'évolution des bancs de sable (Garlan, 1990), des côtes (Aernouts, 2005) ou de l'hydrodynamisme des estuaires (Garnaud, 2003 ; Delsinne, 2005).

2.2. Les modèles de base

Grâce à la modélisation de l'hydrodynamique il est possible d'établir les valeurs moyennes des sens et directions du transport sédimentaire. Mais la quantification de ce transport est insuffisante puisque nos études montrent des différences importantes entre les déplacements des dunes et les directions données par les modèles hydrodynamiques (cf. Figure 2).

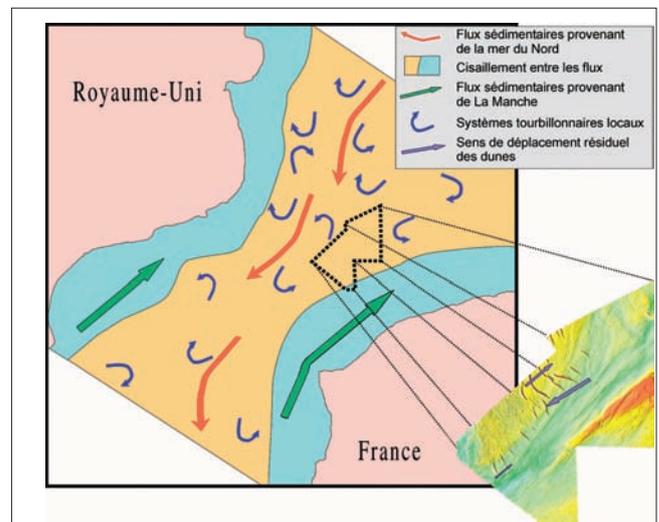


Figure 2 : Circulation régionale des sédiments dans le Pas de Calais, pour un coefficient de marée de 95, et sens de déplacement moyen des dunes de sables dans le chenal de navigation.

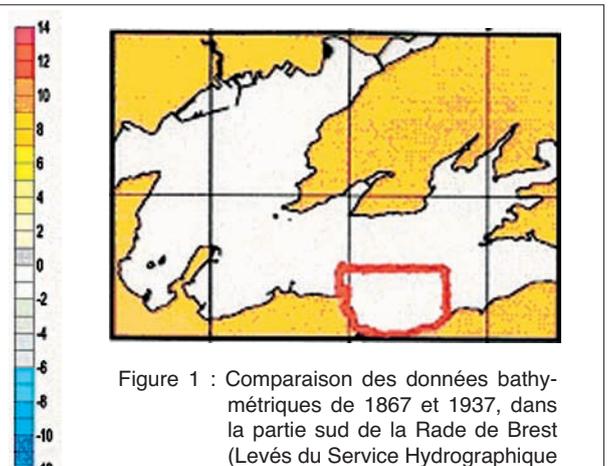
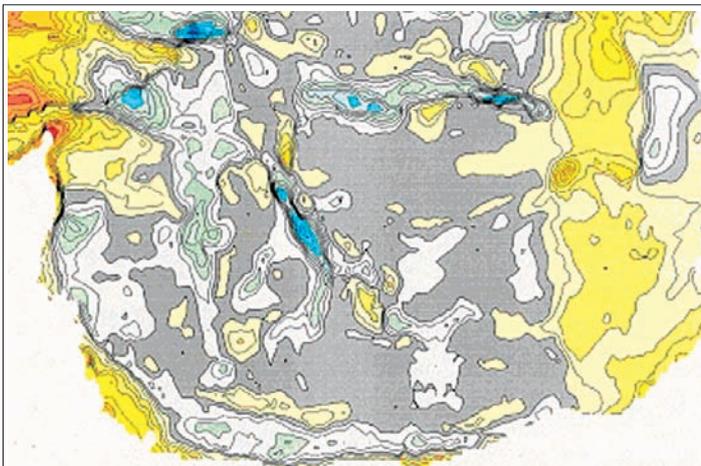


Figure 1 : Comparaison des données bathymétriques de 1867 et 1937, dans la partie sud de la Rade de Brest (Levés du Service Hydrographique de la Marine, Le Faou, 2000).

La modélisation de la migration des structures sédimentaires se base donc sur une étude comparée des levés réalisés depuis plusieurs décennies sur certaines dunes de la Mer du Nord, sur une approche naturaliste d'observation des dunes permettant de définir leurs paramètres caractéristiques (taille des grains, angle des pentes, dimensions des dunes, ..) et sur une modélisation hydrodynamique affinée par la compréhension des processus mis en jeu.

Le transport sédimentaire est engendré lorsque la tension de frottement sur le fond remet en mouvement les particules sédimentaires. Il s'effectue alors soit par glissement, roulement ou saltation, mécanismes regroupés sous le terme générique de charriage, soit en suspension engendrant un déplacement des particules dans l'eau à la vitesse du fluide. Selon la vitesse du courant, la profondeur qui accroît la pression sur les grains, la viscosité du fluide et la forme et densité des particules, un courant aura ou non la faculté de transporter des particules d'un diamètre donné. Depuis les années 1930, ces observations ont été transcrites dans des diagrammes Erosion-Sédimentation-Transport tel que celui de Hjulström.

Barthe et Castaing (1989) ont montré, à partir de données sédimentologiques et hydrodynamiques, que les sédiments non cohésifs du plateau continental du Golfe de Gascogne étaient mis en mouvement par l'action des courants de marée et par les houles de tempêtes ; la durée de déplacement varie de quelques heures par an pour les profondeurs supérieures à 100 mètres, à plus de un mois entre 30 et 50 mètres. Une telle étude permet de disposer d'une approche régionale et de distinguer les secteurs où la dynamique sédimentaire est active et fréquente, et les secteurs épisodiquement concernés où seule la récurrence des tempêtes engendre des modifications. L'intervention d'autres phénomènes comme les marées internes, les courants d'upwelling, ..., ne peut être exclue à proximité du talus et peut engendrer des mouvements particuliers locaux difficiles à caractériser et quantifier. En 1969, lors d'une réunion de la Société géologique de France, Gilbert Boillot observait : « La granulométrie des sédiments est plus grossière vers le large que vers la terre. Vous interprétez ce fait en invoquant les variations du niveau marin au cours du Pléistocène. Ne pensez-vous pas que les courants induits par les ondes internes au bord du plateau peuvent vanner actuellement les sédiments reliques et par conséquent expliquer l'accroissement granulométrique que vous constatez? ». Personne ne sut répondre à cette question, aujourd'hui encore les arguments pertinents font défaut. Des mesures de courant près du fond associés à des mesures des déplacements sédimentaires sont exceptionnellement réalisées elles sont pourtant indispensables pour la mise en évidence de l'impact des tempêtes et permettraient de progresser dans la connaissance de la dynamique des sédiments et structures sédimentaires sur la plateforme externe.

Les modélisations du transport des sédiments peuvent être regroupées en deux classes ; l'approche énergétique de Bagnold (1941) et l'approche probabiliste d'Einstein (1972). Les équations de Bagnold sont le plus fréquemment utilisées en domaine marin et nous nous limiterons à cette approche; elles ont été établies pour des sables éoliens, mais plusieurs auteurs ont montré qu'elles s'appliquaient également pour

les sables littoraux ou fluviaux. L'approche de Bagnold part du principe que le flux de sédiments est proportionnel au flux énergétique. Le modèle original quantifiait les flux de sable induits par le vent (q_s) à partir de la vitesse de cisaillement (u^*) des particules de densité (ρ_s) lorsqu'elles touchent le sol, de leur trajectoire (l), et de la vitesse initiale du grain (w) :

$$q_s = (\rho_s/g) u^{*2} w$$

Le flux particulaire par charriage et suspension a ensuite été pris en compte, à l'aide de deux paramètres caractérisant les particules transportées. Les sédiments étant caractérisés par leur granulométrie moyenne (d et D) :

$$q = 1.8 (d/D)^{1/2} (\rho/g) u^{*3}$$

La formule de Gadd et al (1978), issue de celle de Bagnold, est la plus simple d'utilisation. La masse des sédiments transportés par charriage (Q) est ainsi obtenue par la formule suivante, basée sur le coefficient de caractérisation du sédiment (β) et les courants mesurés à un mètre du fond (U_{100}) et nécessaires à la remise en mouvement du sédiment (U_c) :

$$Q = \beta (U_{100} - U_c)^2$$

Les résultats, en kg/m/jour, donnés par cette formule montrent l'intérêt que peut apporter la modélisation pour visualiser les disparités des flux sédimentaires d'une région à l'autre, ou dans un secteur d'étude donné :

- 671 kg/m/jour pour la zone côtière du Pas de Calais, pour un grain moyen de 0,20 mm (Dewez et al, 1989),
- 5 kg/m/jour pour les dunes de Surtainville à l'ouest du Cotentin, pour un grain moyen de 0,45 mm, avec des taux plus faibles pour le flanc doux et le pied du flanc raide des dunes (Berné et al., 1989).
- 500 000 m³/an de sédiments charriés entrant et colmatant la partie orientale de la Baie du Mont-Saint-Michel (Ehrhold et al, 2003).

Afin d'obtenir une masse de transport charrié moyen par mètre linéaire, une sommation entre les différents points doit être réalisée, ce qui n'est pas satisfaisant pour des sédiments hétérogènes. De plus, comme le signalent Berné et al (1989), la non-prise en compte du transport en suspension entraîne une sous-estimation du transport total.

Pour réaliser une modélisation plus fine il est nécessaire de déterminer la vitesse critique de mise en mouvement des sédiments, principal critère de la dynamique sédimentaire, qui permet de différencier les sédiments actifs des sédiments reliques. Pour ce faire, Mallet (1998) utilise :

- le diagramme de Shields pour obtenir la contrainte sur le fond : θ_{cr} Shields (1936), détermine un paramètre adimensionnel (θ) caractérisant la contrainte au fond à partir de u^* : vitesse de frottement (m/s), g : accélération de la pesanteur, d_{50} : grain moyen, $s =$ densité du solide/ densité de l'eau :

$$\theta = u_*^2 / (s - 1)gd_{50}$$

A partir de ce paramètre calculé, le seuil critique de mise en mouvement est obtenu avec le diagramme de Shields à partir de la taille moyenne du grain et de la vitesse de

frottement u_* . Cette relation n'est valable que pour des grains de taille et de forme homogènes, et pour des écoulements d'eau tels que $z/d_{50} > 50$.

- l'équation de Yalin pour déterminer D_* caractérisant les particules,
Le seuil critique de mise en mouvement θ_{cr} intègre le paramètre de granularité D_* (Yalin, 1972) :

$$D_* = d_{50} \left(\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad (3)$$

La variation de la vitesse de l'écoulement sur la verticale est dans la majorité des études de type logarithmique, la vitesse de frottement u_* est dans ce cas déduite de la vitesse moyenne du courant sur la verticale (u) (z : hauteur d'eau (en m), z_0 : rugosité, k : constante empirique de Prandtl) :

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

- l'équation de Van Rijn (1989) pour obtenir la tension de frottement :

$$\tau = \rho u_*^2 \quad (\text{N.m}^{-2})$$

Idier (2002) utilise une fonction quadratique pour estimer cette tension de frottement au fond :

$$\tau = \rho \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} \quad (\text{N.m}^{-2})$$

où C est donné par la formule :

$$C = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{\Delta z}{D_g} \right) + 4,9$$

D_g étant lui-même défini par la profondeur z , et le coefficient de Chézy C_h est tel que $D_g = (26,4/C_h)^2 z$

Dans le cas où l'on ne peut pas mesurer directement cette contrainte à partir des mesures de courants, la formule suivante basée sur la profondeur et la pente de l'écoulement (i) est alors utilisée :

$$\tau = \rho g z i \quad (\text{N/m}^2)$$

τ_0 est soit déduite de mesures effectuées en canal, avec des grains sphériques, une granulométrie uniforme, un fond non rugueux, un régime turbulent établi, et des écoulements uniformes stationnaires soit à partir des mesures in-situ de courants.

Une fois la contrainte sur le fond calculée, différentes formules de transport peuvent être utilisées. La formule de Bijker (1992) donne le transport par charriage en introduisant un terme pour le transport, la seconde partie de la formule correspondant à la mise en mouvement :

$$Q_{sc} = b D_{50} \left(\frac{\tau_{ce}}{\rho} \right)^{0,5} \exp \left(-0,27 \frac{(\rho_s - \rho)g D_{50}}{\tau_{cwe}} \right)$$

Mallet (1998), comme Bartholdy et al (2004), préfère la formule d'Engelund et Hansen (1967) qui offre des taux de transport en accord avec les résultats de traçages radioactifs. Certains auteurs signalent néanmoins que ce modèle tend à surestimer le taux de transport. Idier (2002) utilise également cette formule en la comparant à celles de Bagnold-Gadd, Van Rijn, et de Meyer-Peter & Müller, en soulignant leurs domaines granulométriques d'établissement (0,2-2 mm pour Van Rijn), 3,17-28,6 mm pour Meyer-Peter & Müller).

Selon la formule d'Engelund et Hansen, établie pour les sédiments de grain moyen compris entre 0,2 et 4 mm, la quantité de sédiments transportés par charriage pour une vitesse instantanée du courant (u) et une contrainte exercée sur le fond (t_0), s'écrit :

$$Q_c = 0,05 u^2 \rho_s \sqrt{\frac{d_{50}}{(s-1)g}} \left(\frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho)d_{50}} \right)^{3/2}$$

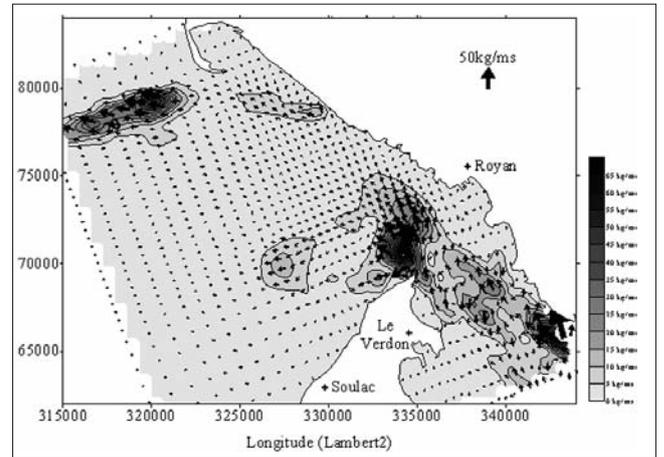


Figure 3 : Représentation des vecteurs de transport résiduels par charriage, calculés à partir de la formule d'Engelund et Hansen (1967) après 192 heures de simulation de l'embouchure de la Gironde (coefficient de marée de 43 à 76, débit du fleuve réel).

Dans sa modélisation des dunes du Pas de Calais, Idier (2002) calcule la quantité totale de transport, en ajoutant au charriage, la modélisation des suspensions à partir de la formule de Van Rijn :

$$Q_s = 0,012 U z \left(\frac{U - U_{cr}}{\sqrt{(s-1)g D_g}} \right)^{2,4} \left(\frac{D_g}{z} \right) D_*^{-0,6}$$

Les quantités de sédiments transportés obtenues sont fréquemment remises en question par les auteurs eux-mêmes et motivent ainsi le développement de nouvelles formulations. Sans entrer dans le détail analysons comment les sédiments sont représentés dans les modèles.

2.3. Les différentes formulations pour le calcul des volumes de transport

Camenen et Larroudé (*in* Trentesaux et Garlan 2000) observent que les formules de transport ne sont représentatives que d'une petite partie des processus sédimentaires ; il est donc important de les utiliser avec beaucoup de précautions et de les cantonner aux environnements spécifiques pour lesquelles elles ont été établies. Certaines formules ont été développées pour le domaine fluvial puis adaptées aux environnements côtiers alors que d'autres expriment d'avantage l'action des houles. Poursuivant leurs travaux, Camenen et Larroudé (2003), définissent les limites d'utilisation de plusieurs modèles, ils remarquent qu'il est impossible de disposer d'une simple formule qui serait valide pour tous les cas et prendrait en compte tous les paramètres en jeu et en interaction. Lorsqu'il est pris en compte, le flux en suspension est caractérisé par la concentration moyenne en particules dans la tranche d'eau, sans tenir compte de la nature des particules transportées, des particularités de forme, de la floculation, ... La caractérisation des sédiments y est donc donnée par des coefficients, le plus souvent empiriques, empêchant de rendre ces modèles universels. Les paramètres caractérisant le fond dans les différents modèles de quantification du charriage et du flux sédimentaire peuvent être regroupés en 6 familles (Garlan, 2004) :

- les paramètres physiques : porosité, densité,
- la granularité,
- les paramètres intégrant la granularité et les courants (τ , θ , U_{100cr}),
- les caractéristiques de la rugosité,
- les coefficients de charriage et suspension,
- l'épaisseur de la couche sédimentaire concernée.

La rugosité est un des paramètres les plus influant en modélisation hydrodynamique car elle peut engendrer des différences d'un facteur 10 dans les quantités de sédiments charriés calculées. Ce coefficient peut être obtenu à partir de la granularité des sédiments, par les formules de Soulsby (1997) pour les environnements de rides de courants, ou de Van Rijn (1989) en présence de mégarides. Cette dernière formule prend en compte la forme des rides (H_r hauteur et L_r Longueur des rides sédimentaires et la granularité du sédiment (d_{50}) :

$$k_s = (1 \text{ à } 3)d_{50} + (12 \text{ à } 20)H_r^2/L_r$$

La rugosité étant difficilement mesurable, les modélisateurs prennent donc le plus souvent une valeur approximée extraite d'autres études. La rugosité variant au cours du temps et spatialement, des valeurs adaptées aux sédiments en présence devraient en toute rigueur être intégrées à chaque nœud du modèle.

La médiane et le grain moyen utilisés pour caractériser le sédiment dans ces diverses formules sont inadaptés pour les sédiments marins qui, contrairement au milieu terrestre, sont le plus souvent hétérogènes. Les différents modèles sont le plus souvent adaptés à une catégorie de sédiments dominante dans le secteur d'expérimentation du modélisateur (cf. Figure 4). Il est important de prendre en compte ces domaines d'application pour choisir la formule de transport la mieux adaptée à son domaine d'étude comme le souligne Ilier (2002).

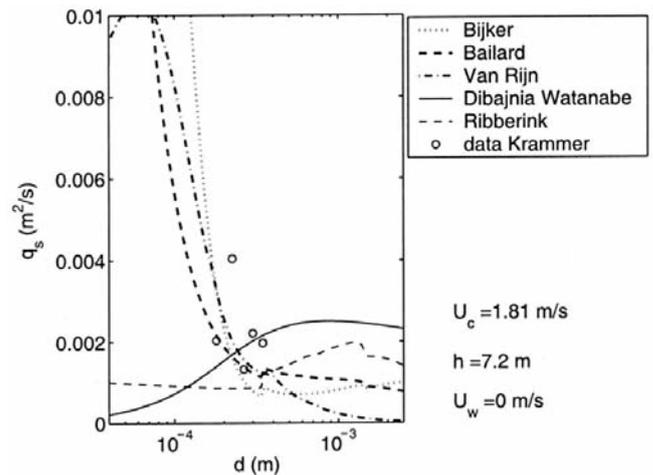


Figure 4 : Influence de la granularité sur le transport des sédiments sous l'action des courants selon différentes formules de transport (Camenen et Larroudé, 2003).

Heathershaw (1981) obtenait un facteur variant de 1 à 10 sur le débit solide calculé, selon les formules employées ; des études plus récentes font état d'écart similaires, voir même parfois supérieurs. Mallet (1998) observe que les formules de transport par charriage reposent sur de nombreuses hypothèses simplificatrices :

- la houle et les effets du vent sont négligés,
- la granulométrie est supposée uniforme,
- le stock sédimentaire est estimé permanent et infini,
- les vitesses de courants sont uniformes sur la verticale.

Ce chapitre a montré que les modèles de dynamique sédimentaire ne peuvent être utilisés que dans des milieux équivalents au secteur ayant servi pour le développement du modèle. Il n'existe donc pas de modèle universel et la variabilité des résultats obtenus montre combien il est important de prendre précisément en compte les processus hydrodynamiques et la variabilité des fonds marins.

2.4. La dynamique des structures sédimentaires

La réalisation de différentiels de données de profondeur est la plus simple méthode de caractérisation du déplacement des structures sableuses. En dynamique sédimentaire, le temps est un paramètre primordial classé par Cowell et Thom (1995) selon quatre processus spatio-temporels :

- « instantanés » : impliquant les agents dynamiques primaires tels que la houle et les marées, et s'appliquant aux particules et structures de petites dimensions : rides, mégarides, ...;
- « événementiels » : comprenant les tempêtes ou les variations environnementales saisonnières ;
- « séculaires » : comprenant des phénomènes à plus long terme comme ceux responsables de l'édification des flèches sableuses ;
- « géologiques » : concernant les modifications à l'échelle d'un bassin et pour des échelles de temps allant de l'année jusqu'aux variations eustatiques.

Les études sur les dunes de sable se sont longtemps cantonnées aux processus instantanés. Nous allons voir que la dynamique des structures sableuses doit également intégrer les processus événementiels, et même séculaires dans le cas des bancs.

Grâce à la haute résolution des Sondeurs MultiFaisceaux (SMF), la sécurité de la navigation peut être garantie, mais durant combien de semaines, de mois ou d'années la morphologie d'une dune ou d'un banc peut-elle être estimée conforme au levé hydrographique? Peut-on prédire l'évolution de la morphologie de ces fonds ou au moins définir la période de récurrence des levés pour que la carte marine demeure fiable? De nouvelles dunes peuvent-elles surgir entre deux levés hydrographiques? Et dans l'affirmative, quelle est la période durant laquelle cette non-apparition est garantie?

2.4.1. L'état de la connaissance

Plus d'une centaine de chercheurs provenant d'une vingtaine de pays ont participé aux « Workshops Marine Sandwave Dynamics » qui se sont déroulés à Lille en 2000 (Trentesaux et Garlan, 2000) et à Twente aux Pays-Bas en 2004 (Hulsher, Garlan et Idier, 2004). Les conférences ont porté sur les études de cas de dunes fluviales jusqu'aux dunes de sable de la plateforme, de la paramétrisation des structures (de la forme des dunes à l'enfouissement), ainsi que des modélisations analytiques, numériques ou physiques en cuve.

Pourquoi est-on encore à un stade aussi peu avancé dans le domaine de la modélisation des dunes de sable sous-marines? Tout d'abord, parce que la localisation des structures sédimentaires dans les fonds marins était jusque dans les années 1980 trop imprécise pour permettre de mesurer des déplacements de l'ordre du mètre ou de la dizaine de mètres. Ensuite, parce que les données et études sur les dunes étaient, et restent encore, trop rares pour qu'une modélisation réaliste soit possible. Comme le dit Stolk (in Trentesaux et Garlan 2000) « *On the migration of sand-waves only a few datasets are available* ».

Les travaux menés au SHOM ont entre autres pour objectif de prédire l'évolution de la morphologie des fonds et préciser la récurrence optimale des levés. L'accent est mis sur la Mer du Nord car la conjugaison d'une navigation très importante de super tankers et de dunes mobiles pose un réel problème de sécurité de la navigation. Le Bot et al. (in Trentesaux et Garlan 2000) étudient les modalités de l'évolution morpho-dynamique des dunes à partir de mesures in situ et du calcul par modélisation statistique. Le sédiment dunaire, constitué de sables et graviers coquilliers, est mobilisé durant plusieurs heures lors de chaque phase de courant de marée. Les courants induits par les vents moyens et les tempêtes modifient l'asymétrie des courants tidaux, jusqu'à l'inverser. Ils peuvent éroder le flanc raide des dunes et inverser leur sens de progradation. D'autres régions françaises ont été présentées lors du workshop de Lille (Trentesaux et Garlan, 2000), depuis la côte (Balouin et Howa ; Michel et al ; Sabatier et Provansal) jusqu'à des domaines de quelques dizaines de mètres de profondeur (Garnaud et al ; Berné) ; les observations faites au Canada

(Mosher et Thomson) montrent que, par des fonds de 60 mètres et plus, la dynamique des dunes de sable pourrait encore être active.

Après les premiers essais de modélisation, les questions concernant les structures et les phénomènes à modéliser sont encore à un stade préliminaire. Quel est l'impact de la granulométrie, de la profondeur? Comment interagissent les dunes et les courants? Sans répondre à toutes ces questions les workshops ont permis d'affiner la connaissance et de confronter les problèmes et avancées dans les différents domaines de l'acquisition à la modélisation. Comme le remarque Schüttenhelm (in Trentesaux et Garlan, 2000): « *Sand waves in the southern North Sea are an enigmatic result of a dynamic equilibrium between sand, tidal currents and wave energy.* » Et Mosher et al (in Trentesaux et Garlan, 2000) ajoutent : « *The stability of the dune field remains unanswered. Repetitive multibeam bathymetric surveys and long term current flow monitoring are required to answer this question.* » Pour de nombreux auteurs la dynamique sédimentaire des dunes et leur modélisation sont complexes car mal définies; Powell et al (in Trentesaux et Garlan, 2000) estiment que « *The formation and disappearance of sediment bedforms occurring under the action of waves and currents is the result of a complex interaction between the fluid and the underlying sediment; this is poorly understood, yet extremely important, in both physical and numerical models of coastal processes. Bedforms affect bottom roughness and shear stresses, wave attenuation, and sediment transport.* » De nombreuses questions restent encore en suspens « *What are the physical mechanisms causing sand waves in shallow shelf seas to migrate and at what rate?* » (in Trentesaux et Garlan, 2000). Sont le plus souvent soulignés, lors des workshops sur ce sujet, le déficit de données et le caractère trop local et instantané des études.

En 2001, le SHOM a mené une campagne de suivi de la morphologie et des variations courantométriques près du fond dans le Pas de Calais. Cette campagne a montré que les petites dunes surimposées, migraient sur le flanc doux, pour rejoindre la crête de la dune puis dévaler en avalanche le flanc raide. La dynamique à court terme des dunes peut ainsi être directement liée à la dynamique des petites structures surimposées. Les vitesses de déplacement constatées, rapides pour les structures surimposées et lentes pour la dune, montrent que des levés récurrents à haute résolution ne sont pas la meilleure réponse pour la connaissance hydrographique. Afin de se prémunir contre les hauts-fonds dangereux pour la navigation, il serait nécessaire de chercher la surface occupée par la dune et l'enveloppe de ses points hauts, mais aussi et surtout de conserver l'historique de la dune et les conditions hydrodynamiques subies juste avant le levé hydrographique, afin de déterminer son point haut historique; la modélisation servant à calculer sa hauteur théorique.

Parmi les paramètres descriptifs des dunes, la pente maximale pouvant être atteinte par le flanc abrupt est déterminante pour savoir si les grains de sables se sont déplacés par avalanche, charriage ou glissement. Ce mode de déplacement des grains, à l'origine du mouvement des dunes, est important dans la compréhension du phénomène pour pouvoir le modéliser.

2.4.2. La morphologie des dunes de sable

2.4.2.1. La génération des dunes

Pour caractériser la dynamique des dunes, il est nécessaire de disposer de données à long terme de très grande qualité sur la vitesse et la direction de migration, la période de retour, la forme et évolution de la crête, la granulométrie. Si comme c'est souvent le cas, on ne dispose pas de données mettant en évidence la naissance et développement d'une dune, c'est par la modélisation que le temps de génération d'une dune peut être obtenu. Le modèle de génération des dunes (Blondeaux et al. *in* Trentesaux et Garlan 2000 ; Idier 2002), ne fournissent pas de résultats pertinents dans les secteurs complexes tel que la partie méridionale de la mer du Nord (Le Bot, 2001). La sous-estimation du transport en suspension pourrait être à l'origine des écarts observés (Idier, 2002). La prévision sur la création de dunes de sables et leur développement jusqu'à la saturation n'est toujours pas concluante.

2.4.2.2. La classification des dunes

Les dunes, comme les rides, sont des ondulations sédimentaires, souvent périodiques, possédant une crête, un flanc doux et un flanc raide. Ces corps sédimentaires transversaux sont modélés par l'action des courants sur des sédiments (cf. figure 5). L'orientation de leurs crêtes est quasiment perpendiculaire à la direction principale des courants; toutefois, des variations angulaires sont fréquemment observées et peuvent atteindre 20° autour de cette direction (Le Bot, 2001). Les caractéristiques sédimentaires sont plus déterminantes que l'intensité du courant pour la forme des dunes. Blom et al. (2000) indiquent que, lorsque le courant ne peut pas mobiliser l'ensemble des particules sédimentaires, les dunes sont barkhanoïdes¹, alors qu'elles présentent une forme rectiligne lorsque le courant est saturé en sédiments.

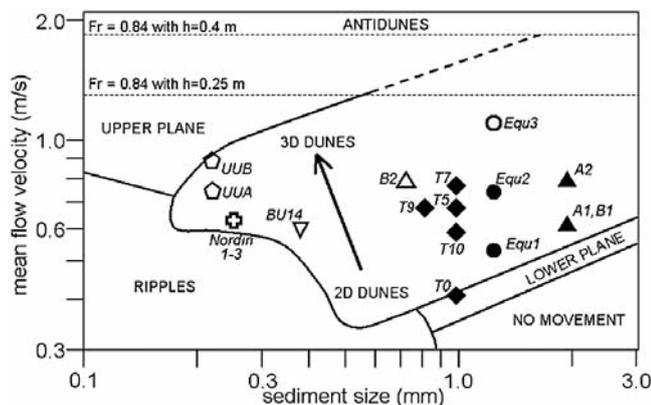


Figure 5 : Diagramme de stabilité des structures sableuses ; les figurés ouverts représentent les dunes 3D, les figurés fermés représentent des dunes 2D (Kleinhans, *in* Trentesaux et Garlan, 2000).

La classification la plus usitée pour les rides est obtenue à partir de quatre paramètres mesurés sur profil dont les variations traduisent les conditions hydrodynamiques et la dispo-

nibilité en sédiments: la longueur d'onde (L), l'amplitude (H), l'angle du flanc doux (α) et du flanc raide (β).

Pour bien classifier toutes les structures sableuses, il est de plus nécessaire de disposer des paramètres caractérisant la dimension surfacique tel que l'aplatissement des rides ($RI = \lambda/H$), l'indice de symétrie ($RSI = \lambda_{am}/\lambda_{sv}$), l'indice de linéarité ($SI = ld/d$), l'indice de bifurcation ($BI = LB/\lambda$). Ces indices permettent de différencier :

- les structures transverses aux courants: rides d'oscillation symétrique ou non, rides linguoïdes, rides rhomboïdales, rides superposées, rides juxtaposées, rides d'interférence, antidunes, dunes, dunes linguoïdes, barkhanes, dunes rhomboïdales,
- les structures transverses liées aux houles : hummocks²,
- les structures longitudinales aux courants : bancs de sable, rubans sableux, ...

Les rides, hormis les rides rhomboïdales d'estran, sont ubiquistes. Lenôtre (1977) observe ainsi que des rides photographiées en domaine océanique, par 7 535 mètres de profondeur, sont en tout point comparables aux rides observées sur l'estran. L'ubiquité des structures de plus grande dimension, dunes et bancs, n'est pas aussi évidente, même si elles semblent exister du domaine fluvial jusqu'aux dunes contouritiques observées à la base du talus continental, ainsi du reste que dans le domaine désertique.

La forme de la crête des dunes permet de qualifier le processus sédimentaire. En effet, avec la diminution des courants, elle évolue des dunes linéaires (rectilignes ou anastomosées) aux dunes sigmoïdes ou en forme de barkhanes plutôt symptomatiques des pentes et des zones déficitaires en sédiments. Cette forme peut être définie par le paramètre de sinuosité correspondant à la longueur de la crête divisée par la ligne droite reliant ses deux extrémités. Les dunes à crêtes linéaires sont selon plusieurs auteurs les plus lentes, les dunes barkhanoïdes présentent par contre des vitesses importantes ; Berné et al (1989a) décrivent ainsi un déplacement moyen annuel de 70 m/an pour une barkhane du Pas de Calais.

2.4.2.3. Les modèles de Flemming

Les premiers modèles, réalisés à partir d'observations en canal ont permis de dresser des diagrammes délimitant les zones de formation des différentes figures sédimentaires en fonction de la vitesse des courants et de la taille des grains. Plus les sédiments sont grossiers plus les dunes peuvent être hautes.

Flemming donne pour des sédiments de grain moyen D, les valeurs caractéristiques de Hauteur maximum (H_{max}) et de longueur d'onde (L) des dunes :

D = 0.063 mm :	$H_{max} \approx 0.028$ m	L ≈ 0.14 m
D = 0.125 mm :	$H_{max} \approx 0.8$ m	L ≈ 7 m
D = 0.250 mm :	$H_{max} \approx 9.0$ m	L ≈ 130 m
D = 0.500 mm :	$H_{max} \approx 24.0$ m	L ≈ 380 m
D = 1.000 mm :	$H_{max} \approx 30.0$ m	L ≈ 600 m

1 Barkhanoïde : Dunes sous-marines ayant une forme proche de celle des barkhanes, qui sont des dunes des déserts de sable en forme de croissant.
2 Hummocks : structures sédimentaires bombées, décimétriques, observées à plusieurs dizaines de mètres de profondeur et induites par la houle.

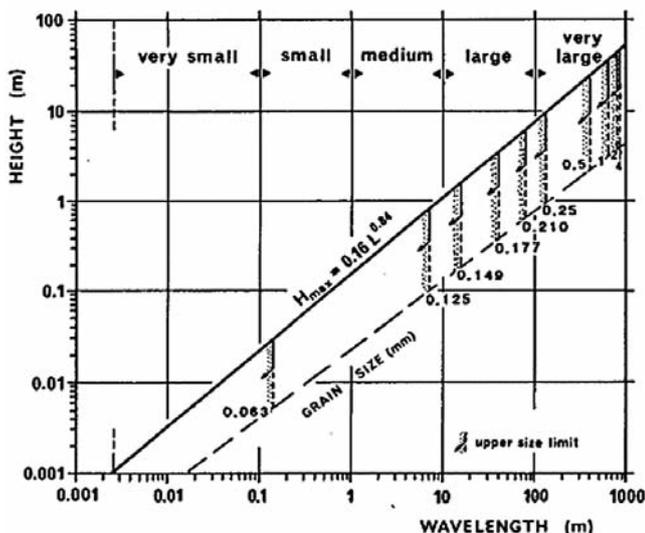


Figure 6 : Hauteur des dunes / Longueur d'onde /Granulométrie (Flemming in Trentesaux et Garlan, 2000).

La compilation des paramètres descriptifs de 1 500 dunes de divers environnements de toutes les mers du globe, permet à Flemming de proposer un modèle statistique sans discontinuité des rides aux dunes géantes (cf. Figure 6), avec pour principales caractéristiques :

- la hauteur des dunes comprise entre 0.001 et 20 mètres,
- la longueur d'onde variant de 0.01-1000 m
- l'équation de la hauteur des dunes vis-à-vis de leur espacement : $H_{moyen} = 0.0677 \lambda^{0.8098}$
- l'équation de la hauteur maximale des dunes : $H_{Maximum} = 0.16 \lambda^{0.84}$

Cependant, comme l'indique Bartholdy et al. (in Trentesaux et Garlan, 2000), le simple fait qu'il existe des dunes surimposées contredit la relation dimension des dunes - profondeur, également proposée par Flemming.

Le symposium Classification of large scale flow Transverse Bedforms a abouti à une classification présentée par Ashley (1990), qui est désormais largement admise. Cette classification (cf. Tableau 1) concerne les structures sableuses générées par les courants unidirectionnels, les courants alternatifs et la combinaison des deux. Les dunes sont définies par leur longueur d'onde, le H_{moyen} du diagramme de Flemming permet d'obtenir la hauteur des dunes correspondantes.

Classes	Longueur d'onde (λ)	Hauteur calculée avec H_{moyen}
Petites dunes	$0.6 \text{ m} < \lambda < 5 \text{ m}$	$0.075 \text{ m} < H < 0.4 \text{ m}$
Dunes moyennes	$5 \text{ m} < \lambda < 10 \text{ m}$	$0.4 \text{ m} < H < 0.75 \text{ m}$
Grandes dunes	$10 \text{ m} < \lambda < 100 \text{ m}$	$0.75 \text{ m} < H < 5 \text{ m}$
Très grandes Dunes (ou géantes)	$\lambda > 100 \text{ m}$	$H > 5 \text{ m}$

Tableau 1 : Classification des dunes marines sous l'action de courants unidirectionnels et/ou alternatifs (Ashley, 1990).

Jusque dans les années 1995, les études des dunes ne pouvaient, pour des limites technologiques, s'intéresser qu'aux dunes grandes et géantes. Avec la résolution des nouveaux SMF, il est désormais possible de cartographier précisément les dunes moyennes et de pouvoir suivre leur évolution. Cela se traduit par de nombreuses études sur ces petites structures et leur détection (Kleinhans et al ; Idier et Astruc), présentées au workshop Marid 2004 (Hulscher et al. 2004).

Une étude rigoureuse sur des champs de dunes devrait reposer sur une analyse comparative avec les modèles globaux de Flemming. De tels modèles constituent également un élément de base très important pour la modélisation numérique. Mais Flemming a remarqué que pour quatre levés répétitifs effectués par lui sur les côtes d'Afrique du Sud, des modèles H/L différents ont été obtenus selon les conditions hydrodynamiques.

2.4.3. La nature des dunes de sable

Des observations faites par plongeurs dans le Pas de Calais nous ont montré que des dunes de 10 mètres de haut pouvaient avoir leur crête surmontée de près de un mètre de sédiments grossiers coquilliers, très instables et pulvérisants. Nos observations en Mer du Nord (cf. Figure 7) ainsi que la bibliographie indiquent que la granularité est rarement homogène à l'échelle d'une dune. Citons quelques exemples extraits des présentations des workshops de Lille et Twente (Trentesaux et Garlan, 2000 ; Hulscher et al, 2004 :

- Dans les dunes de sables de la Mer du Nord l'accroissement des courants aux abords de la crête se traduit généralement par des sédiments plus grossiers et mieux triés, mais en présence de mégarides surimposées sur la dune, les choses deviennent plus complexes (Flemming, 2000)
- Ernsten et al. (2004) remarquent que les barkhanes présentent en leur centre des sédiments grossiers et une hauteur maximale, alors que de part et d'autre la granularité et la hauteur de la dune diminuent.
- Kleinhans et al (2004) indiquent que la relation entre la granularité et la dimension des structures sableuses s'observe même pour les petites dunes telles que les hummocks.
- Passchier et Kleinhans (2004) montrent que la bioturbation du polychète *Lanice conchilega* peut être à l'origine de la diminution de la granularité du sédiment de surface et du mauvais classement, entraînant la diminution de la taille des structures sableuses par rapport aux secteurs avoisinants dépourvus de ces tubes de vers.

- Bartholdy et al (2004) estiment que la dimension des dunes provient de l'interrelation entre les courants, et que la « réponse » de la structure est hautement dépendante de la granularité.

Ces derniers auteurs établissent, pour des dunes moyennes à grandes surimposées à des grandes et très grandes dunes des abords du Danemark, une relation de la hauteur et de la longueur d'onde des dunes surimposées en fonction du grain moyen (avec H : la profondeur (m), GM : le grain moyen (unité Phi), L : la longueur d'onde (m)) : $H = 0,17 GM^{1,68}$ et $L = 7,90 GM^{0,68}$

Pour exemple la dune du Pas de Calais, schématisée sur la Figure 7, présente une granularité croissante du pied au sommet de la dune avec la présence de graviers et cailloutis dans un sédiment sableux.

Les formules de Bartholdy donnent pour les dunes sur-

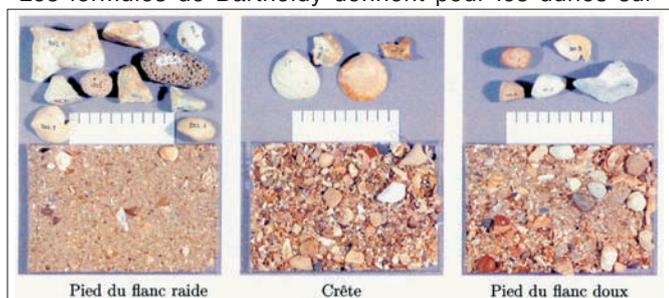
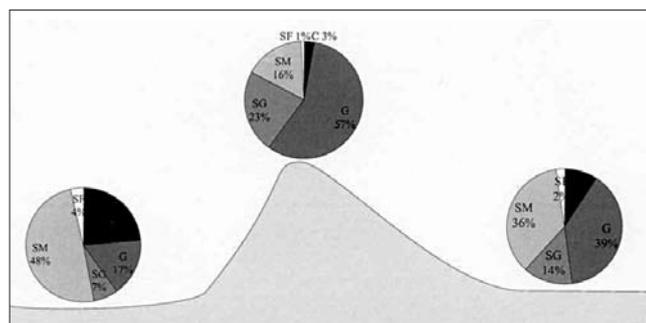


Figure 7 : Variabilité des sédiments d'une dune du Pas de Calais, avec séparation des cailloutis du reste des sédiments, et répartition des différentes phases sédimentaires montrant une diminution de la proportion de sable grossiers (SG), moyens (SM), et fins (SF) en crête au profit des graviers (G) (Idier, 2002).



imposées de la dune l une hauteur H : 0,4 m et une longueur d'onde λ : 1,15 m, qui correspondent bien aux dimensions observées sur le flanc de cette dune. Mais les mégarides deviennent plus hautes au sommet de la dune où elles peuvent atteindre 2 mètres. Le fait que des formules puissent permettre de caractériser les dimensions de dunes surimposées montre que les mégarides et les dunes pourraient être assimilées à deux modes sédimentaires évoluant différemment tout en présentant la même morphologie.

2.4.4. Le déplacement des dunes

En domaine désertique, les barkhanes ne se déplacent que de quelques mètres par an, mais leur forme peut changer en quelques jours après une tempête, et des rides peuvent apparaître en quelques heures (Michaut, 2003). Nous allons voir que ces observations semblent également exister en domaine marin, où la migration des dunes marines dépend de la combinaison d'agents périodiques (marée) et/ou irréguliers (vents et tempêtes). La caractérisation des vitesses mesurées dans la nature est primordiale pour valider les modèles numériques, car cette vitesse intègre la profondeur, la pente, la nature des sédiments et les facteurs hydrodynamiques (courants de marée et vagues). La variabilité des facteurs hydrodynamiques fait qu'il n'existe pas de données générales ni de lois statistiques sur la vitesse de déplacement des structures sédimentaires. Les synthèses bibliographiques telles que celles de Wever (*in* Hulscher et al, 2004), se heurtent à la difficulté de disposer de tous les paramètres à l'origine du déplacement, ainsi qu'au trop petit nombre de publications. Il apparaît de plus qu'une dune présente des déplacements variant au cours du temps. Il n'existe donc pas à l'heure actuelle de formulation robuste de la dynamique des dunes. Voici quelques analyses de vitesses données par différents auteurs :

- Flemming (*in* Trentesaux et Garlan, 2000) et Idier (2002, 2003) soulignent que les petites dunes et mégarides se déplacent plus rapidement que les grandes ce qui favorise le développement des dunes surimposées. Cette interaction semble avoir un impact important sur les variations de la vitesse de déplacement des dunes.
- Berné (*in* Trentesaux et Garlan, 2000) donne des vitesses résiduelles annuelles caractéristiques de plusieurs environnements européens avec pour maxima 7 m/an à Long Island, 15 m/an en Manche, 25 m/an dans l'estuaire de la Tamise, 60 m/an dans le German Bight, et 70 m/an dans le Pas de Calais.
- Le Bot (2001) décrit dans la partie méridionale de la Mer du Nord des déplacements moyens annuels avoisinant 20 m/an mais aussi des déplacements beaucoup plus rapides sur de courtes périodes de temps.
- Mallet (1998) pour des grandes dunes mesure des valeurs allant de quelques mètres à 40 m/an.
- Garnaud et al. (*in* Trentesaux et Garlan, 2000) mettent en évidence des déplacements de 50 mètres en 3 mois dans un environnement où des dunes existaient déjà cinquante ans auparavant
- Wever et Stender (*in* Trentesaux et Garlan, 2000) observent dans l'estuaire de l'Elbe des petites dunes présentant des vitesses de plusieurs décimètres par jour (100 à 600 m/an).
- Les dunes géantes sont parfois couvertes de petites ou moyennes dunes. Idier (2003), décrit dans le secteur méridional de la Mer du Nord des dunes de 0,2 à 2 mètres de haut ayant des vitesses atteignant de 0,4 à 1,2 m/h (cf. Figure 8). Les oscillations de ces dunes moyennes, déterminées par le flot et le jusant, conduisent à des déplacements moyens de un à deux mètres par marée et des écarts de profondeur pouvant atteindre deux mètres en 5 heures.

Ces résultats posent le problème de mesure de la vitesse: la vitesse résultante ramenée à une année, basée sur des levés hydrographiques espacés dans le temps, peuvent masquer des mouvements de plus grande ampleur. Ainsi Le Bot (2001) observe une relation entre l'intensité de la dynamique et l'espacement entre les levés ; pour une série de dunes de la Mer du Nord le déplacement moyen annuel est ainsi de 7 m, 17 m et 472 m lorsque l'écart entre les levés est respectivement de 10 ans, 1 an et 7 jours. Donc plus le délai entre les levés est rapproché, et plus la dynamique semble intense.

Le Bot et al. (2001) expliquent ce phénomène par l'analyse des variations environnementales :

- à l'échelle de quelques mois à quelques années, la migration varie en fonction de l'activité des tempêtes et, dans une moindre mesure, des vents moyens. Ces deux facteurs renforcent, ralentissent ou inversent la migration d'origine tidale ;
- à l'échelle décennale, la migration contrôlée par le courant résiduel de marée est constante. Cela provient semble-t-il de la périodicité de 8 à 11 ans des fluctuations de l'oscillation Nord Atlantique (NAO), et donc d'un nombre relativement stable de tempêtes par décennie.

Nous obtenons ainsi dans la littérature des vitesses comprises entre un et quelques dizaines de mètres/an pour les grandes dunes et les dunes géantes, et des vitesses de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres pour les petites et moyennes dunes. La dynamique réelle des dunes est ainsi bien plus intense que celle perçue par les études comparatives de levés espacés sur quelques années présentés jusque dans les années 2000.

2.4.5. La modélisation de la dynamique des dunes de sable.

Comme l'ont montré Le Bot et al. (2000b) et Le Bot (2001), la dynamique sédimentaire à long terme dans le Pas de Calais est contrôlée par les courants de marée avec une tendance à la rotation dans le sens horaire. Les bancs de sables imposent des modifications de la circulation des courants et de la dynamique des dunes. La prédiction des changements morphologiques des dunes passe par une bonne connaissance des agents hydrodynamiques et de leur capacité à remobiliser les sédiments, ainsi que par la prise en compte la plus fine possible des échelles spatiale et temporelle. Les mesures de courants près du fond réalisées durant la campagne PERMOD (Idier, 2003), sur une dune du sud de la Mer du Nord, ont montré :

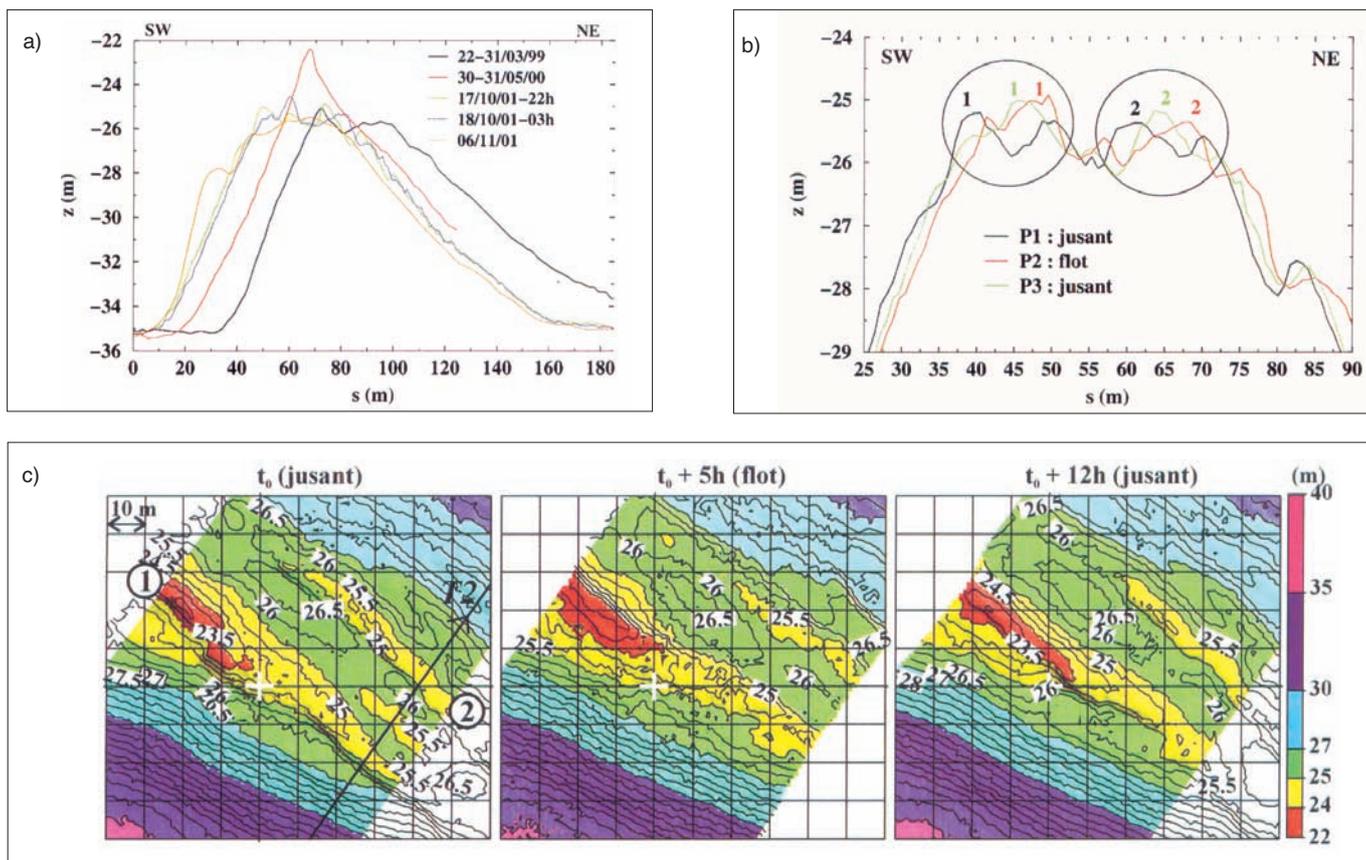


Figure 8 : Suivi à haute résolution d'une dune de la Mer du Nord a : évolution pluriannuelle de la dune I de 1999 à 2001 ; b : dynamique oscillante des dunes moyennes sur la crête de la dune I à l'échelle d'une marée ; c : évolution de la morphologie de la dune de la figure b sur 12 heures (Idier, 2002).

- que les déplacements moyens décennaux étaient en accord avec les circulations résiduelles de marée,
- que le vent était le facteur principal, devant la houle et la pression, susceptible de modifier les courants sur toute la tranche d'eau jusqu'au fond, voire d'empêcher la renverse du courant de marée,
- que la vitesse des courants était encore influencée par la dune à 150 m en aval de celle-ci, et qu'elle pouvait atteindre jusqu'à 180 cm/s à 1,15 m au dessus du fond, avec une composante verticale importante (jusqu'à 50 cm/s).

Cette forte dynamique permet d'expliquer la présence éparse de coquilles de plus de 20 mm de diamètre ainsi que de fortes proportions de graviers (jusqu'à 60 %), sur la crête de la dune étudiée.

A partir des résultats obtenus par télédétection satellitaire et sonar latéral, Hennings et al. (in Trentesaux et Garlan, 2000) soulignent que la vitesse des courants est plus forte au-dessus des dunes, et que la variation de la direction des vagues et les changements de direction des courants de marée sur les dunes de sable doivent être pris en compte pour la modélisation des facteurs hydrodynamiques.

Mulhearn (1996), dans son étude sur l'enfouissement de mines de guerre par les dunes, part du modèle de transport par charriage de Kalinske et Frijlink qui prend en compte la densité des grains, la médiane et la rugosité :

$$Q = 5d_{50}\rho_s \sqrt{(d_{50}g((\rho_s - \rho_w)/\rho_w)\theta')^{(-0,27/\theta')}} \quad (a)$$

Le profil d'une dune étant ramené à un triangle de hauteur H, le sédiment transporté est également donné par la formule :

$$Q = 0,5\rho_s(1-n)HC \quad (b)$$

A partir des formules a et b, Mulhearn (1996) déduit la vitesse (C) des dunes, qui varie pour les côtes australiennes de 0,0012 à 2,9 m/jour :

$$C = 10d_{50}\sqrt{0,03U^{((-0,27/\theta')/(1-n)H)}}$$

avec U : le courant moyen et $\theta' = d_{50}g((\rho_s - \rho_w)/\rho_w)$

Pour l'analyse des processus à l'origine de la dynamique des dunes, Idier (2002) a exécuté les phases suivantes :

- déterminer le couplage adapté entre le module hydrodynamique et le module sédimentaire pour obtenir des temps de calcul admissibles, le couplage des équations hydrodynamiques et sédimentaires à chaque pas de temps de calcul étant impossible même avec de gros calculateurs ;
- identifier les processus impliqués dans la génération des dunes, afin de pouvoir modéliser le déplacement de dunes sans que celle-ci ne perde sa forme ;

- analyser l'origine de la saturation des bancs et dunes et identifier les processus faisant que ces structures atteignent des amplitudes finies ; (la saturation correspond au stade où la dune a atteint son développement maximum, avant ce stade il n'y a pas accord entre l'hydrodynamisme et la taille de la dune) ;
- évaluer la capacité du modèle à reproduire quantitativement la migration de dunes réelles.

A cela s'ajoutent des points non spécifiques à la dynamique des dunes tels que la modélisation de la turbulence et l'impact des différentes formulations du charriage.

La modélisation par application d'un modèle hydrodynamique pour calculer les flux de sédiments puis en déduire l'évolution du fond n'est pas adaptée aux structures sédimentaires, car il est nécessaire de prendre en compte la rétroaction de l'évolution du fond sur les courants. C'est la raison pour laquelle une équation basée sur la conservation de la matière et reposant sur la porosité du sédiment a été établie; dans cette démarche la pente, autre paramètre important, est prise en compte par la formule de Koch et Flokstra (Idier, 2002). Nos travaux se sont appuyés sur les modules hydrodynamiques Telemac 2D/3D et d'évolution Sisyphus du logiciel TELEMAC (Hervouet et Van Haren, 2000). Dans le module d'évolution du fond, seul le transport par charriage est pris en compte, via une formule de transport empirique (van Rijn). En outre, une attention particulière a été portée sur les agents hydrodynamiques et la rugosité. Le principal problème rencontré concerne les temps de calcul. En effet, sur une station de travail Sun Ultra 5™, la durée nécessaire pour la simulation morphodynamique 3D d'une dune typique soumise à un courant oscillant est de 7 jours pour modéliser 2 marées (environ 25 heures). Et pour reproduire la dynamique de la partie orientale de la dune étudiée (cf. Figure 8) il faut presque 10 fois plus de temps de calcul que le temps réel. En outre, si la modélisation de la dune est satisfaisante, celle des mégarides surimposées ne l'est pas puisque celles-ci disparaissent du modèle numérique au bout de quelques heures de progression du modèle.

L'un des problèmes rencontrés dans la modélisation des dunes est la part jouée par les avalanches et les suspensions ; en effet dans une étude sur la migration des dunes, Kostaschuk et Illersich (1995) observent que seuls 5 % du transport ont lieu par charriage, le reste se faisant par suspension. Idier (2002) mesure qu'en crête de dune, les sables sont transportés par charriage et suspension alors que les graviers, pouvant atteindre à ce niveau de la dune jusqu'à 7 mm, demeurent tractés sur le fond. Aux abords de la dune le charriage persiste deux fois plus longtemps que la suspension. Ces observations ne semblent pas universelles ; par exemple Van den Berg et Van Gelder (1998) estiment que la dynamique de certaines dunes est dominée par du charriage et celle d'autres par suspension, engendrant des morphologies différentes.

Comme nous l'avons dit au début de ce chapitre, nous nous sommes limités aux sédiments arénacés ; la présence d'un faible pourcentage de silts ou argiles dans les sables suffit pour accroître la résistance à l'érosion et modifier fortement les processus sédimentaires. L'envasement pouvant résulter

de l'évolution du climat ou de la présence d'organismes, peut être à l'origine de modifications de la dynamique sédimentaire ; de telles évolutions du fond doivent donc être surveillées et prises en compte.

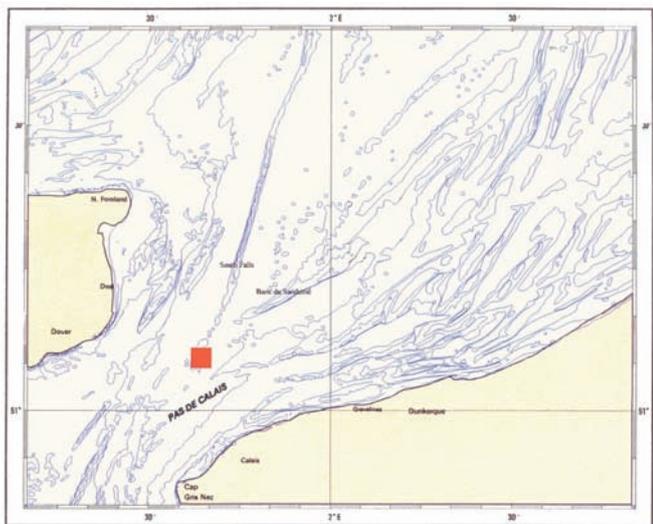
2.4.6. Les structures sableuses trop complexes pour être modélisées

Les dunes comme tous les objets naturels sont plus complexes que ne le montrent les schémas généralement présentés. Les dunes « classiques » forment, il est vrai, la majorité des structures rencontrées en Mer du Nord (cf. Figure 9a). Parmi les différents champs de dunes, les dunes isolées de la figure 9 ont été choisies parce qu'elles se situent dans un rail de navigation et sont donc fréquemment surveillées, mais aussi parce qu'elles sont bien individualisées et de forme assez simples.

Toutes ces dunes ne montrent pas une morphologie aussi simple, et des levés récents du SHOM ont permis de détecter de fréquentes exceptions, décrites dans les paragraphes suivants, en marge des classifications de structures sédimentaires courantes.

Deux techniques ont permis de faire progresser la connaissance et de pouvoir enfin disposer de mesures permettant de quantifier la dynamique des structures sédimentaires :

- a) L'augmentation de la précision des systèmes de localisation par satellite tels que le GPS différentiel permet de mesurer la dynamique sédimentaire sans que les déplacements observés puissent être remis en cause ; les déplacements étaient auparavant (avant 1985) fréquemment du même ordre de grandeur que la précision de la localisation.
- b) La couverture surfacique haute résolution, offerte par les sondeurs multifaisceaux et sonars latéraux, permet depuis les années 1990 de détecter les petites dunes jusqu'alors ignorées dans les formations actuelles et de disposer de la morphologie complète des dunes.



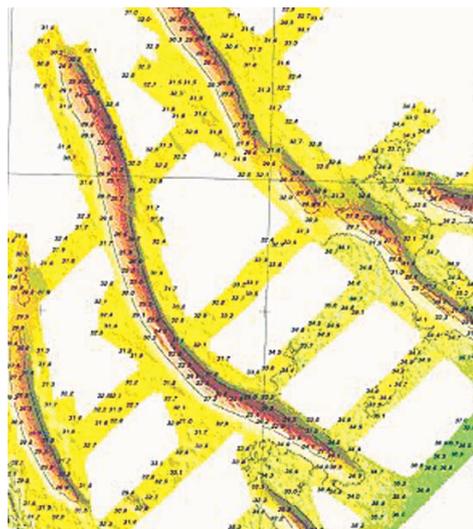
a : Morphologie des fonds marins de la partie méridionale de la Mer du Nord extraite des données bathymétriques du SHOM.

2.4.6.1. Les mégarides hexagonales du plateau corse

L'étude des sédiments actuels est utile pour la compréhension des formations géologiques, l'inverse peut l'être également. C'est le cas des structures hexagonales décrites dans les formations géologiques, comme par exemple les formations ordoviciennes étudiées par Guillocheau (1983), analysées comme symptomatiques de l'impact des tempêtes sur des sédiments situés à des profondeurs de 50 à 60 mètres. De telles tempestites de 50 à 60 cm de diamètre ont été filmées aux abords de Punta Spano (Corse) par 50 mètres de profondeur avec la caméra sous-marine du SHOM lors d'un levé effectué en collaboration entre le SHOM, le BRGM et la région de Corse (Pluquet, 2006).



Figure 10 : Rides hexagonales de 50 à 60 cm de diamètre, au large de Punta Spano (Corse).



b : Extrait du levé au sondeur multifaisceaux de la Zone F de Mars 2001.

Figure 9 : Champs de bancs et dunes de la partie méridionale de la Mer du Nord.

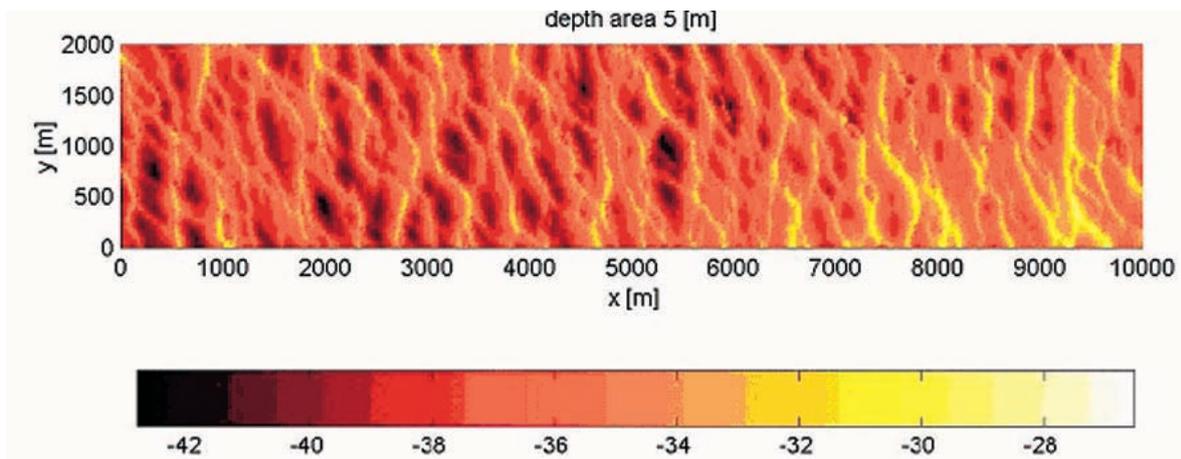


Figure 11 : Bathymétrie de la Mer du Nord aux abords d'Europe (Nemeth et al., in Trentesaux et Garlan, 2000).

2.4.6.2. Les dunes croisées au large des Pays-Bas

A partir de données sondeur multifaisceaux, Knaapen et al. (2001) décrivent une nouvelle forme de structure sédimentaire présentant une longueur d'onde de 1600 mètres et un angle de 50 à 60° par rapport aux courants de marée. Il s'agit de dunes dont les caractéristiques sont différentes des bancs et dunes de sable de la classification d'Ashley. Ces auteurs ont réalisé une analyse spectrale afin de voir quelles interférences avaient pu engendrer ces structures. Si une solution analytique est impossible le passage à la modélisation numérique d'une telle complexité demeure irréalisable.

2.4.6.3. Les dunes du Golfe normand breton

Lors d'un levé hydrographique mené par le SHOM de 1998 à 2002 au nord de la Bretagne ont été mis en évidence des dunes à crêtes méridiennes de 5 à 13 mètres de hauteur par des fonds de 78 mètres. La figure 12 montre que dans cet environnement les dunes sont imbriquées, parfois en baïonnette et même parfois croisées ce qui semble mettre en évidence un double mode hydrodynamique. La figure 12d correspond au stade le plus original rencontré puisque la structure transverse y est constituée de séries de dunes hectométriques plus ou moins sigmoïdes formant un angle d'une

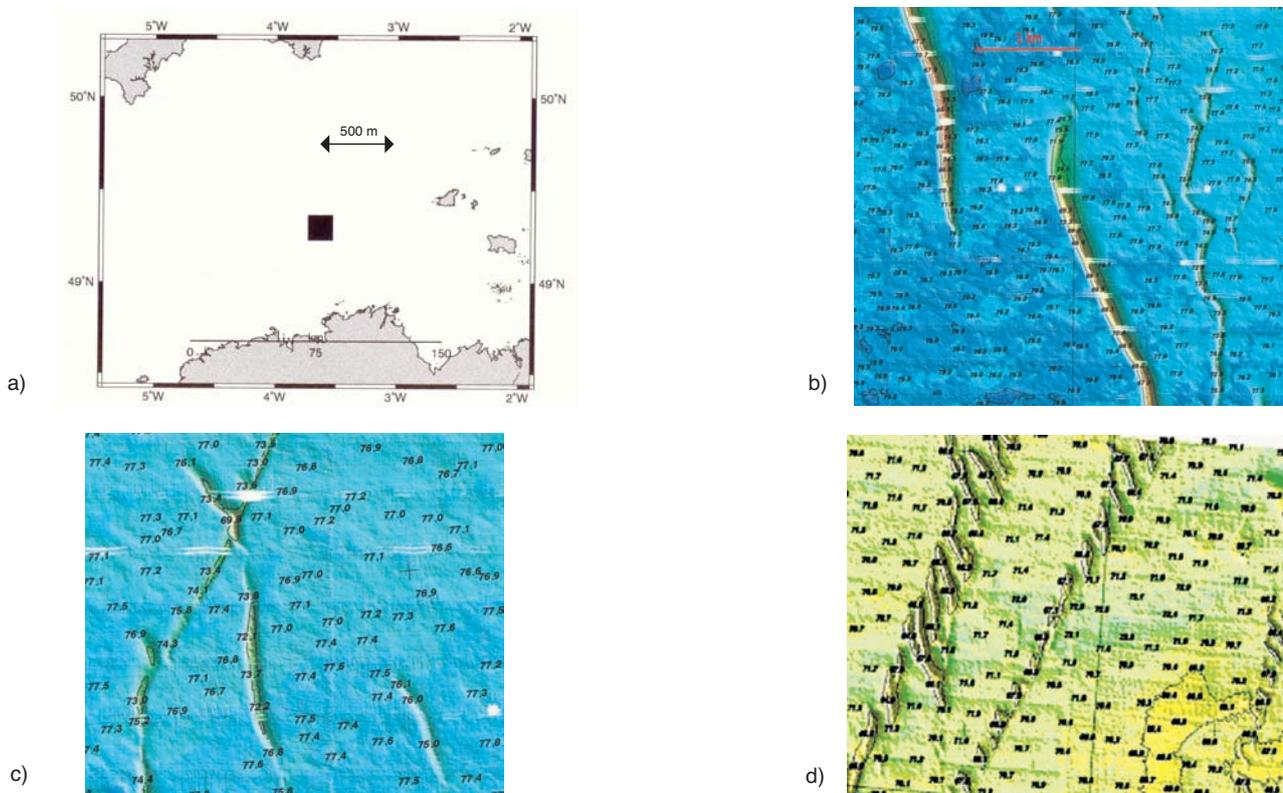


Figure 12 : Champ des dunes complexes du Nord Bretagne.

trentaine de degrés par rapport à l'axe de la structure. Ces rides sédimentaires composées de dunes en S seraient à la limite entre le transit vers l'ouest des dunes occidentales (cf. Figures 12b et c) et d'un transit vers la Baie du Mont-Saint-Michel (Kenyon, 2004, communication personnelle).

Ces dunes 3D éparses couvrent toute la région; certaines évoquent une forme de barkhane, mais la plupart sont sigmoïdes. Elles ont un flanc abrupt dirigé vers l'ouest et une hauteur le plus souvent comprise entre 5 et 10 mètres. L'une des particularités de ce secteur est la longueur des systèmes de dunes imbriquées qui peut dépasser 10 kilomètres. Il s'agit de dunes dans un environnement déficitaire en apports de sédiments, ce qui se traduit par une très mauvaise corrélation H/λ . La forme et les dimensions de ces dunes semblent montrer qu'elles peuvent être actives. La forme barkhanoïde de certaines dunes (cf Figure 12d) pourrait même traduire des vitesses importantes de courant. Si un seul levé hydrographique permet de cartographier la répartition de ces dunes, seules des mesures de courants près du fond associées à une modélisation permettraient de connaître leur dynamique.

2.4.6.4. L'alignement de dunes du Nord Trégor

La mission TREGOR réalisée en collaboration avec le BRGM en 2000 (cf. Figure 13a), avait pour objectif la reconnaissance d'une structure morphologique inexplicée, découverte lors d'une extraction de la Base de Données Bathymétriques du SHOM (cf. Figure 13b) et confirmée par des données bathymétriques plus anciennes. Il s'agit d'une série de dunes alignées en échelonné, comportant quelques diverticules (cf. Figure 13c).

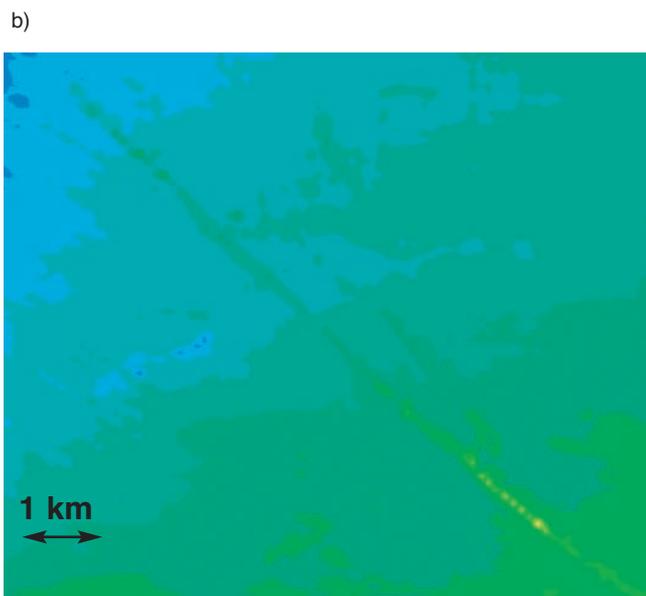
Cette structure de 5 mètres de hauteur, par des profondeurs de 60 à 70 m, et dont la longueur avoisine 11 kilomètres, est comparable aux « *linear dunes* » ou « *Seif dunes* », décrites en milieu désertique. Toutes les structures sableuses ter-

restres ont des dimensions beaucoup plus importantes, jusqu'à dix fois supérieures, de leurs équivalents marins ; les seifs sahariennes n'échappent pas à cette règle avec des hauteurs moyennes de 100 mètres et des longueurs atteignant 100 kilomètres.

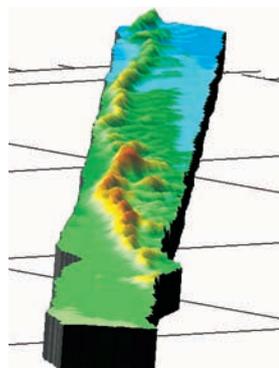
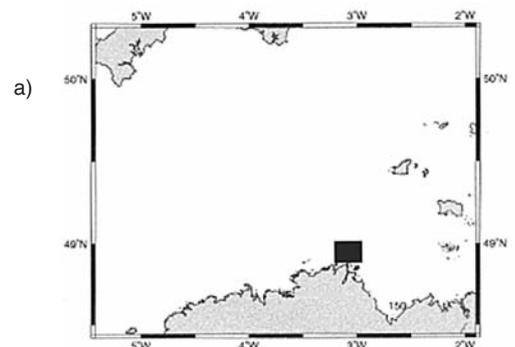
En domaine émergé, McKee (1979) établit une description de toutes les structures dunaires et réalise une classification en partie applicable au domaine marin :

- les taches de sables, observées fréquemment en milieu marin,
- les dômes circulaires, auxquels pourraient être assimilés certains bancs massifs,
- les barkhanes ou dunes en croissant, décrites dans plusieurs environnements marins,
- les dunes barkhanoïdes, comme celles du flanc ouest du banc de la Schôle (cf. §1.4.5.7),
- les dunes en étoiles réputées stables en milieu désertique et reproductibles par modélisation de l'action d'un courant sur un tas de sable, inconnues dans le domaine marin,
- les linear dunes ou Seifs, dont le système marin du Nord Trégor présenté en figure 13 semble le seul exemple marin (Garlan, 2004).

Les deux dernières classes sont les seules de la classification de McKee (1979) dont nous n'avons trouvé aucune description dans le domaine marin. Les Seifs sahariennes sont des dunes actives linéaires formées par l'action de vents de direction variable (unique, bimodale ou complexe), à l'inver-



Extrait de la Base de Données Bathymétriques du SHOM avant la campagne TREGOR



Modèle 3D obtenu à partir d'un profil SMF EM1002S (MHA 2000).

Figure 13 : Dunes linéaires imbriquées du Nord Trégor.

se des barchanes et dunes transverses qui subissent l'action de vents de direction unique. Des études très récentes sur les Seifs concernent la planète Mars. Dans leur modélisation des dunes désertiques, Bishop et al (2002), décrivent les Seifs comme des dunes longilignes sinueuses à crête aigue, situées à la frontière entre les dunes transverses et les dunes en étoile (cf. Figure 14).

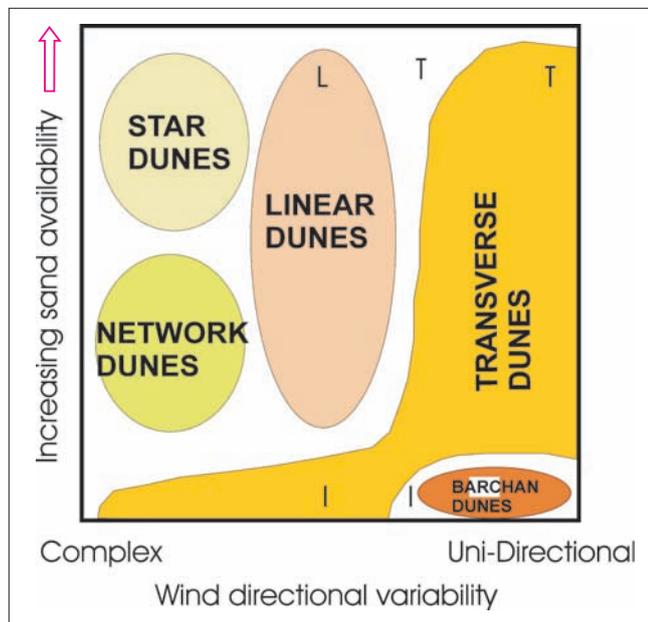


Figure 14 : Distribution des différents types de dunes en fonction des quantités de sable disponible et de la variabilité des vents (Livingstone et Warren, 1996) complété des résultats de modélisation de Bishop et al (2002). T: Transverses dunes, I: Isolated dunes, L: Linear dunes.

Les exemples sahariens et martiens décrits dans la littérature semblent comparables à l'alignement de dunes de la région de Paimpol. La position en entrée nord-ouest de la Baie de Saint Brieuc semble du reste favoriser des directions différentes de courants. En l'absence de mesures de courants près du fond, la bimodalité ou complexité des courants liés à ces Seifs dunes reste à prouver.

2.4.6.5. Les dunes de la fosse centrale de la Manche

A la limite entre le platier et la fosse centrale de la Manche, empreinte fossile de la paléo-Seine, sont alignées des dunes symétriques dont la longueur est de l'ordre de 1 kilomètre et la hauteur de 5 à 6 mètres (cf. Figure 15). L'absence de dunes sur le versant nord de cette fosse pourrait être liée à la circulation des courants, mais le manque d'informations pertinentes ne permet pas de conclure; en effet, l'absence de mesures de courant près du fond dans la fosse et sur le plateau contigu empêche de déterminer l'intensité de la dynamique et l'origine de la dissymétrie morphologique. Les dunes de la fosse Manche ont des caractéristiques montrant qu'elles sont encore actives; leur vergence indique un déplacement vers le domaine océanique au sud ouest, en accord avec les schémas de dynamique sédimentaire de la Manche (Belderson et al 1971, Auffret et al 1975).

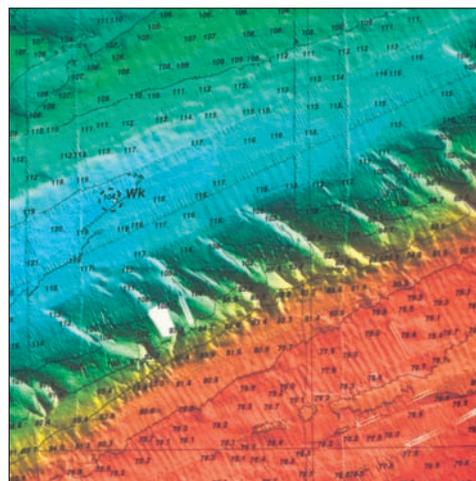


Figure 15 : Dunes de la bordure méridionale de la fosse centrale de la Manche, extrait du levé hydrographique SHOM, 1998.

2.4.6.6. Les dunes du Banc de la Schôle

Le banc de la Schôle, situé entre les îles anglo-normandes, est une structure de 7 km de long sur 1 km de large, de hauteur 35 mètres par des fonds de 40 mètres. Son flanc est constitué de dunes anastomosées, de plus de 15 mètres de hauteur, orientées vers le sud. Sur le flanc ouest, une partie abrupte et lisse ourle la crête puis s'observe un système complexe de chevrons et de rides en V caractérisant un déplacement vers le nord (cf. Figure 16a). Le banc, composé d'un flanc doux, d'un flanc abrupt et couvert de dunes, est structuré par un vortex d'une dizaine de kilomètres centré sur la pointe nord du banc (cf. Figure 16b) et n'a pas l'angle caractéristique des bancs classiques par rapport aux courants. Comme dans le cas des ridins de Calais (Garlan, 1990), nous observons la rotation de dunes de sable sur les flancs d'un banc qui reste stable.

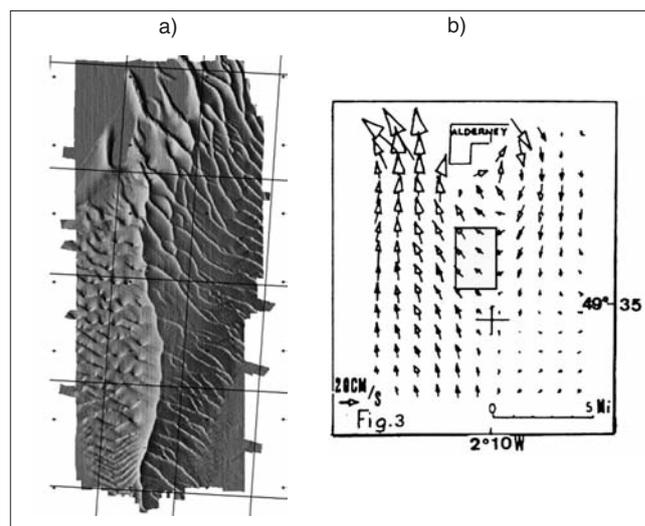


Figure 16 : Banc de la Schôle (a : Modèle Numérique de Terrain ombré à partir du levé SMF EM1002S (SHOM, 1999) ; b : Modèle de courants résiduels de marée au niveau du banc (Walker et Orbi, 1985, in Hommeril, 1987).

3. CONCLUSION

Les dunes sont contrôlées par la vitesse et la direction des courants de marée, la disponibilité et la granularité des sédiments, les courants liés aux houles et tempêtes, les reliefs locaux naturels et anthropiques, la pente et la rugosité à l'échelle des sédiments et des petites dunes. Par un phénomène de rétroaction, les modèles de courants sont également affectés par la nature des sédiments et par la morphologie des structures sédimentaires. Des dunes peuvent ainsi engendrer des courants d'upwelling allant jusqu'à modifier les courants de surface même lorsque la crête de la dune est à plus de 10 mètres de profondeur (Hennings, *in* Trentesaux et Garlan, 2000).

L'utilisation des données sédimentologiques permet :

- d'améliorer la qualité des modèles de courants en prenant un coefficient de friction à chaque nœud de la maille, issu des cartes de nature de fond et de structures sédimentaires,
- de valider les modèles de courants 3D en comparant les vecteurs près du fond avec les figures sédimentaires symptomatiques des sens de transit (dunes, rubans, traînées, ...),

Les modèles apportent également beaucoup aux études de sédimentologie, ils permettent de :

- quantifier les temps de création des structures sableuses pour définir la récurrence minimum des levés hydrographiques,
- définir si les sédiments et les dunes sont stables ou en déplacement.

Les progrès récents en modélisation de la dynamique sédimentaire permettent désormais de vérifier la cohérence des déplacements avec les observations statistiques. Il sera peut-être possible par la suite de dégager les caractéristiques régionales telles que les tempêtes, la bioturbation ou autres particularités par l'analyse des écarts entre les observations et les résultats des modèles.

Pour gérer les effets à court et moyen terme, il faut disposer d'une chaîne de modèles des courants, des sédiments et des houles. Il est donc essentiel au départ de disposer d'une description fine de chacun des processus et de réaliser un séquençement en boucle des divers modules afin de gérer les diverses interactions. Les temps de calcul limitent le plus souvent l'utilisation des modèles à de petits secteurs et sur de courtes périodes (quelques cycles de marée). Ces limitations imposent donc de réaliser ces modélisations sur des régions dont l'environnement est simple et la dynamique sédimentaire très importante.

Pour définir le déplacement de dunes plus complexes, comme celles de la fosse centrale de la Manche, l'usage de modèles serait nécessaire car, en l'absence de levés comparatifs et de mesures de courants près du fond, il ne peut être établi si les dunes sont reliques ou actives. Mais la réalisation de modèles nécessite elle-même d'avoir une connaissance quasi parfaite des courants près du fond et de savoir prendre en compte l'effet de fond. Le progrès de la connaissance sur la migration des dunes repose donc sur un

bouclage entre l'acquisition de données hydrographiques et le développement de modèles adaptés. Nos études ont apporté de réels progrès dans la connaissance des processus et la modélisation du déplacement de l'extrémité d'une dune a donné des résultats conformes aux observations. La modélisation prédictive du déplacement de dunes réelles n'atteint pas encore un stade opérationnel.

L'analyse et la modélisation des dunes de sables du secteur méridional de la Mer du Nord ont permis d'obtenir de nombreux résultats (Garlan, 2004) dont certains sont pertinents pour l'hydrographie ou l'enfouissement d'objets :

- la hauteur de saturation d'une dune est de l'ordre de 35% de la profondeur,
- le temps de formation des dunes serait de l'ordre de 25 ans,
- les dunes isolées de la Mer du Nord se déplacent 1,5 fois plus vite que les dunes regroupées dans des champs de dunes,
- les tempêtes ont un rôle majeur dans le déplacement des dunes, accélérant la migration lorsque les vents sont orientés dans le même sens que le courant dominant, et faisant reculer les dunes par rapport à leur sens de transit décennal dans le cas contraire,
- le déplacement des dunes est relativement constant à l'échelle décennale dans la mesure où le nombre moyen de tempêtes se maintient,
-

Ces résultats constituent de véritables avancées mais devront être validés sur d'autres dunes et dans d'autres environnements.

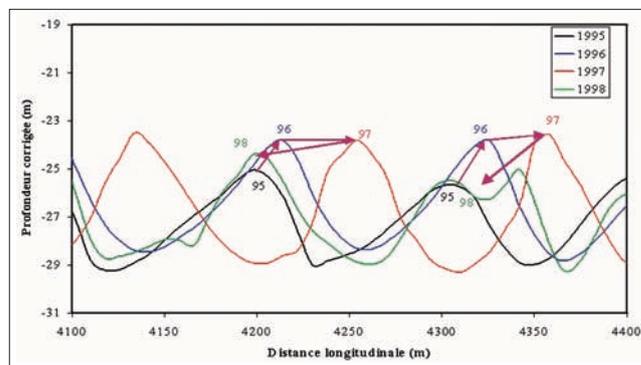


Figure 17 : Le déplacement des dunes dans l'estuaire de la Gironde (Mallet, 1998).

Les dunes de la Mer du Nord nous montrent une dynamique importante mais en 20 ans aucune dune n'est apparue dans notre zone d'étude et aucune n'en est sortie. Des phénomènes de cycles engendrant le retour des dunes à leur point de départ doivent ils être envisagés ? De tels phénomènes semblent exister sur le banc de la Schôle, ils existent dans l'estuaire de la Gironde (cf. Figure 17) et aux abords du bassin d'Arcachon (Michel, 1997), entraînant une dynamique importante à l'échelle de la dune mais une forme de stabilité du système régional sur le long terme.

L'étude de la dynamique des dunes sableuses sous-marines présente l'originalité de ne reposer que sur une bathymétrie très haute résolution et sur la mesure des courants près du fond. Ce domaine de la sédimentologie dépend ainsi des systèmes d'acquisition et des avancées technologiques réalisées pour l'hydrographie et non des systèmes classiquement utilisés en sédimentologie. A ces aspects technologiques s'ajoute l'impact des événements exceptionnels (tempêtes, ouragans, conditions de marées extrêmes) qui était jusqu'alors négligé dans les études et non pris en compte dans les modèles numériques. La dynamique sédimentaire ne peut donc être définie à partir de la seule comparaison de levés, il est nécessaire d'asseoir les résultats, soit sur des séries temporelles de longue durée comportant des espacements d'acquisition variables en durée et représentatifs des différentes conditions météorologiques, soit sur des lots précis et exhaustifs de données décrivant parfaitement le phénomène et servant de base à des modèles numériques. Du chemin reste à parcourir pour que l'une ou l'autre de ces solutions fonctionne de façon satisfaisante, avec notamment des temps de calcul en modélisation inférieurs à la durée réelle des phénomènes à représenter. Les études sur le déplacement des dunes de sable se poursuivent, au SHOM, dans le cadre du projet « Evolution des dunes » qui doit aboutir au développement d'une base de données caractérisant, chaque dune et banc de sable du plateau continental français, par ses paramètres morphologiques, sédimentologiques et météorologiques. Cette Base de Données permettra à terme d'intégrer la dynamique sédimentaire dans la planification et qualification des levés hydrographiques.

4. RÉFÉRENCES

- AERNOUITS D. (2005)
Le rôle des changements bathymétriques à l'avant côte sur l'évolution des littoraux meubles du Cap Gris-Nez à Dunkerque, Côte d'Opale, Nord de la France.
Mémoire de Thèse Université du Littoral Côte d'Opale - Dunkerque.
- ASHLEY G.M. (1990)
Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem.
Journal of Sedimentary Petrology, 60, 1, 160-172.
- AUFFRET G.A., BERTHOIS L., DOUVILLE J.L. (1975)
Observations sur les rides sous-marines du plateau continental.
La houille Blanche, 7, 467-478.
- BAGNOLD R.T. (1941)
The physics of blown sand and desert dunes.
Chapman & Hall Ed., London, 265p.
- BARTHE X., CASTAING P. (1989)
Etude théorique de l'action des courants de marée et des houles sur les sédiments du plateau continental du Golfe de Gascogne.
Oceanologica Acta, 12, 4, 325-334.
- BELDERSON R.H., KENYON N.H., STRIDE A.H. (1971)
Holocene sediments on the continental shelf west of the British Isles. The geology of the Eats Atlantic Continental Margin.
Delany F.M. Ed, Institut of geological Sciences Report, 70/14, 157-170.
- BERNÉ S., ALLEN G., AUFFRET J.P., CHAMLEY H., DURAND J., WEBER O. (1989)
Essai de synthèse sur les dunes hydrauliques géantes tidales actuelles.
Bull. Soc. Geol. France, 6, 1145-1160.
- BIJKER E.W. (1992)
Mechanics of sediment transport by the combination of waves and current
In Design and reliability of coastal structures, Venice, 147 - 173.
- BISHOP S.R., MOMIJI H., CARRETERO-GONZALEZ R., WARREN A. (2002)
Modelling desert dune fields based on discrete dynamics.
Discrete dynamics in Nature and Society, 7, 1, 7-17.
- BLOM, A., RIBBERINK, J.S., VAN DER SHEER, P. (2000)
Sediment transport in flume experiments with a trimodal mixture.
In: Gravel Bed Rivers 2000, New Zealand.
- CAMENEN B., LARROUDÉ P. (2003)
Comparison of sediment transport formulae for the coastal environment.
Coastal engineering, 48, 111-132.
- COWELL P.J., THOM B.G. (1995)
Morphodynamics of coastal evolution.
in Coastal evolution Carter RWG et Woodroffe CD, Cambridge University press, 33-86.
- DELSINNE N. (2005)
Evolution pluri-millénaire à pluri-annuelle du prisme sédimentaire d'embouchure de la Seine. Facteurs de contrôle naturels et d'origine anthropique.
Mémoire de thèse, Université de Caen, 164p.
- DESMAZES F. (2005)
Caractérisation des barres sableuses d'une plage de la côte aquitaine, exemple de la plage du Truc Vert.
Mémoire de Doctorat, Université de Bordeaux 1, 263p.
- DEWEZ S., CLABAUT P., VICAIRE O., BECK C., CHAMLEY H., AUGRIS C. (1989)
Transits sédimentaires résultants aux confins Manche Mer du Nord.
Bull Soc. Géol. France, 8, V, 5, 1043-1053.
- EHRHOLD A. (1999)
Dynamique du comblement d'un bassin sédimentaire soumis à un régime mégatidal.
Mémoire de thèse, Université de Caen.
- EHRHOLD A., GUILLOU S., AUFFRET J.P., GARLAN T., DAN NGUYEN K. (2003)
Modélisation des flux sédimentaires charriés dans la Baie du Mont-Saint-Michel.
Oceanologica Acta, 26, 5, 443-455.
- EINSTEIN A.H., 1972
A basic description of sediment transport on beaches.
in Waves on beaches and resulting sediment transport, R E Meyer Ed., Academic Press, 462p.
- ENGELUND F.A., HANSEN E. (1972)
A monograph of sediment transport in alluvial streams.
Technical press, Copenhagen, 62p.
- GADD P.E., LAVELLE J.W., SWIFT D.J.P. (1978)
Estimate of sand transport on the New York shelf using near shore current meter observations.
J. Sediment. Petrol., 48, 1, 239-252.
- GARLAN T. (1990)
L'apport des levés bathymétriques pour la connaissance de la dynamique sédimentaire. L'exemple des Ridens de la Rade aux Abords de Calais.
Proceedings du Symposium Eurocoast 90, Marseille, 71-75.
- GARLAN T. (1994)
Evolution de la bathymétrie de l'Etang de Berre.
Rapport d'Etude du SHOM N°03/94, 44p.
- GARLAN T. (2004)
Apports de la modélisation dans l'étude de la sédimentation marine récente.
Mémoire d'Habilitation à Diriger la Recherche, Université des Sciences et Techniques de Lille, 155 p.

- GARNAUD S. (2003)
La sédimentation fine sur une plate-forme interne actuelle microtidale : La baie de Seine sud-orientale. Mémoire de Thèse, Université de Caen, 307p.
- HEATHERSHAW A.D. (1981)
Comparisons of measured and predicted sediment transport rates in tidal currents.
Marine geology, 42, 75-104.
- HERVOUET J., VAN HAREN L. (2000)
The TELEMAC modelling system (special issue)
Hydrological Processes, 14 (13).
- HOMMERIL P. (1987)
La mer de la Manche: essai historique sur l'évolution des concepts et techniques de recherches en géologie marine.
Bull. Inf. Géol. Bassin Paris, mémoire hors série, 6, 231-241.
- HULSCHER S.J.M.H., GARLAN T. et IDIER D. (2004)
Marine sandwave and river dunes dynamics II. Enschede, Pays-Bas, 1 et 2 Avril 2004
S. Hulscher, T. Garlan et D. Idier Ed., 351 p.
- IDIER D. (2002)
Dynamique des bancs et dunes de sable du plateau continental: observations in-situ et modélisation numérique.
Mémoire de thèse, INP Toulouse.
- IDIER D. (2003)
Dynamique des dunes de sable sous-marines : Exploitation de la campagne de mesures Permod en Mer du Nord méridionale.
Rapport d'Etudes N° 001/03, SHOM, 83 p.
- IDIER D., EHRHOLD A., GARLAN T. (2002)
Morphodynamique d'une dune sous-marine du Déroit du Pas de Calais.
Compte Rendu de l'Académie des Sciences, 334, 1079-1095.
- KNAAPEN M.A.F., HULSCHER S.J.M.H., DE VRIEND H.J., STOLK A. (2001)
A new type of sea bed waves.
Geophys. Res. Lett., 28, 1323-1326.
- KOSTASCHUK R.A., ILERSICH S.A. (1995)
Dune geometry and sediment transport, Fraser river.
In River geomorphology, EJ Hickin Ed., John Wiley & Sons, 19-36.
- LE BOT S. (2001)
Morphodynamique de dunes sous-marines sous influence des marées et des tempêtes. Processus hydro-sédimentaires et enregistrement.
Mémoire de Doctorat Université de Lille, 273p.
- LE BOT S., TRENTESAUX A., GARLAN T., BERNE S. ET CHAMLEY H. (2000 b)
Influence des tempêtes sur la mobilité des dunes tidales dans le déroit du Pas-de-Calais.
Oceanologica Acta, 23, 2, 129-141.
- LE BOT S., TRENTESAUX A., GARLAN T., CHAPALAIN G., CHAMLEY H. (2001)
Morphodynamique de dunes sous-marines (Déroit du Pas de Calais) : signature de la variabilité décennale des tempêtes.
8^e Congrès Français de Sédimentologie, Publ. A.S.F., Paris, 36, 211-212.
- LE FAOU Y. (2000)
Modèle sédimentologique de la Rade de Brest - géoacoustique et dynamique.
Rapport d'avancement SHOM - Région Bretagne - Université de Bretagne Occidentale.
- LENOTRE N. (1977)
Etude des marques de courant par photographie sous-marine.
Mémoire de Thèse Université de Bordeaux, 100p.
- MALLET C. (1998)
Etude de la dynamique des sédiments non-cohésifs de l'embouchure de la Gironde. Mémoire de Doctorat, Université de Bordeaux 1, 184 p.
- MCKEE E.D. (1979)
A study of global sand seas.
Geological survey professional paper, 1052p.
- MICHAUT C. (2003)
Arpenteurs des dunes.
La recherche, 368, 74-81.
- MICHEL D. (1997)
Evolution morphodynamique d'un littoral sableux situé à l'aval d'une embouchure lagunaire.
Mémoire de thèse, Université Bordeaux 1, 162p.
- MULHEARN P.J. (1996)
A mathematical model for mine burial by mobile underwater sand dunes.
DSTO Aeronautical and Maritime research laboratory, DSTO-TR-0290, 18p.
- PLUQUET F. (2006)
Evolution récente et sédimentation des plates-formes continentales de la Corse
Mémoire de thèse, Université de Corse, 218p.
- SHIELDS (1936)
Anwendung der Ähnlichkeitsmechanick und der turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung
Heft 26. Preuss. Vers. für Wasserbau und Schiffbau, Berlin.
- SOULSBY (1997)
Dynamics of marine sand: a manual for practical applications.
Thomas Telford Ed., 249p.
- TRENTESAUX A., GARLAN T. (2000)
Marine Sandwave Dynamics. Acte du workshop, Lille, France, 23 - 24 Mars 2000
A. Trentesaux et T. Garlan Ed., 240p.

VAN RIJN L.C. (1989)
Handbook of Sediment Transport by Currents and Waves
Delft Hydraulique, Delft, Netherlands, 1002 p.

VAN DEN BERG J.H., VAN GELDER A. (1998)
Flow and sediment transport over large subaqueous dunes :
Fraser river, Canada.
Sedimentology, 45, 217-221.

YALIN M.S. (1972)
Mechanics of sediment transport.
Pergamon press.

DEUXIÈME PARTIE

MISSION OCÉANOGRAPHIQUE DE L'ATLANTIQUE

(1^{er} septembre 1996 – 21 août 1998)

par Alain FOURGASSIE, ingénieur en chef de l'armement (hydrographe)

SOMMAIRE

INTRODUCTION	6-3
1. CONTEXTE	6-4
1.1. Généralités	6-4
1.2. Présentation de la MOA	6-4
1.2.1. Environnement hiérarchique et organisation structurelle	6-4
1.2.2. Moyens	6-5
1.2.2.1. Personnel.....	6-5
1.2.2.2. Moyens flottants	6-5
1.2.2.3. Locaux	6-7
1.2.2.4. Véhicules	6-7
1.2.2.5. Hélicoptère.....	6-7
1.2.2.6. Matériel spécifique.....	6-8
1.2.3. Administration	6-8
2. TRAVAUX RÉALISÉS	6-8
2.1. Campagnes océanographiques.....	6-8
2.1.1. Campagnes ARCANE.....	6-8
2.1.2. Campagne MODYCOT 97-1	6-9
2.1.3. Campagne EVA 97	6-9
2.1.4. Campagne INTIMATE 98	6-9
2.1.5. Campagne PRECOCE 98-3.....	6-9
2.1.6. Campagnes Brittany	6-9
2.2. Campagnes bathymétriques et géophysiques hauturières	6-9
2.2.1. Levés bathymétriques et géophysiques en Atlantique nord.....	6-9
2.2.2. Levé bathymétrique entre la Sardaigne et la Sicile	6-10
2.2.3. GEBCO.....	6-10
2.2.4. Participation aux campagnes réalisées par des navires extérieurs au SHOM	6-10
2.3. Campagnes Rapid Response	6-10
2.3.1. Campagne Rapid Response 96	6-10
2.3.2. Campagnes Rapid Response 97 et 98	6-11
2.4. Levé des accès à la Vilaine.....	6-11
2.5. Recherche d'épaves et d'obstructions sur les côtes françaises de la Méditerranée	6-12
2.6. Levés portuaires à Toulon	6-12
2.7. Levés de plageage en Méditerranée.....	6-12
2.8. Participation à des levés réalisés dans des eaux étrangères	6-12
2.8.1. Levé de plageage au Pays de Galles	6-12
2.8.2. Levé de plageage en Tunisie	6-13
2.9. Travaux sur convention	6-13
2.9.1. Monaco	6-13
2.9.2. Embouchure du Var	6-13
2.10. Concours divers apportés à l'EPSHOM	6-13
2.10.1. Mise en place de marégraphes côtiers numériques	6-13
2.10.2. Campagne de gravimétrie absolue à Brest	6-13

3. CONTRACTUALISATION DES PROGRAMMES	6-13
4. MÉTHODES ET TECHNIQUES	6-13
4.1. Géodésie et topographie	6-13
4.1.1. Systèmes géodésiques.....	6-13
4.1.2. Méthodologie REA (Rapid Environmental Assessment)	6-14
4.2. Localisation	6-14
4.3. Bathymétrie	6-15
4.4. Géophysique	6-15
4.4.1. Gravimétrie	6-15
4.4.2. Magnétisme	6-15
4.4.3. Sédimentologie	6-15
4.5. Instrumentation océanographique	6-15
4.5.1. Courantomètres de coque à effet Doppler	6-15
4.5.2. Poisson remorqué Sea Soar	6-16
4.5.3. Bathysondages	6-16
4.6. Systèmes d'acquisition et de traitement des données	6-16
4.6.1. Chaîne d'acquisition et de traitement AQIDOC – TRADOC	6-16
4.6.2. Chaîne d'acquisition et de traitement HYDRAC – HYTRAI	6-17
4.6.3. Chaîne de traitement du sondeur multifaisceau grands fonds de <i>L'ESPERANCE</i>	6-17
4.6.4. Traitement de la gravimétrie.....	6-18
4.6.5. Réseaux informatiques et liaisons numériques	6-18
4.7. Qualité	6-18
4.7.1. Organisation qualité	6-18
4.7.2. Documentation	6-18
5. ORGANISATION DES CAMPAGNES OCÉANOGRAPHIQUES	6-19
5.1. Responsabilités des différents intervenants	6-19
5.2. Réservation de volumes sous-marins	6-19
6. FORMATION	6-20
7. RELATIONS EXTÉRIEURES	6-20
7.1. Travaux en coopération	6-20
7.1.1. Coopération avec l'OTAN	6-20
7.1.2. Coopération avec les britanniques	6-20
7.1.3. Coopération avec le Portugal	6-20
7.1.4. Coopération avec la Tunisie	6-20
7.2. Escales	6-21
7.3. Visites marquantes	6-21
8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	6-21
LISTE DES PLANCHES	6-21
ANNEXE A : liste des rapports particuliers, comptes rendus de travaux et fiches techniques	6-25
ANNEXE B : autres références	6-27

INTRODUCTION

Ce rapport rend compte de l'activité de la mission océanographique de l'Atlantique (MOA) du 1^{er} septembre 1996 au 21 août 1998, période pendant laquelle j'ai exercé les fonctions de directeur de mission. Cette période a été marquée par une disponibilité satisfaisante, compte tenu de leur âge, des deux bâtiments affectés à plein temps à la mission (BO *D'ENTRECASTEAUX* et BH1 *L'ESPERANCE*). Après la campagne d'hydrographie générale dirigée par mon prédécesseur dans l'océan Indien au premier semestre 1995, et avant celle conduite par mon successeur dans la zone Antilles – Guyane à partir du mois de septembre 1998, l'activité du *D'ENTRECASTEAUX* a été principalement dédiée à des campagnes océanographiques en Atlantique nord-est et aux exercices Rapid Response. *L'ESPERANCE* a poursuivi les levés bathymétriques et géophysiques en Atlantique nord-est. L'activité de la mission en Méditerranée a été pénalisée par la disponibilité médiocre de la *GAZELLE*.

1. CONTEXTE

1.1. Généralités

La mission océanographique de l'Atlantique (MOA), créée le 1^{er} janvier 1996 suite à la dissolution de la mission océanographique de la Méditerranée comprend deux bâtiments, le BO *D'ENTRECASTEAUX* et le BH1 *L'ESPERANCE*, et est chargée des levés océaniques en Atlantique ainsi que des travaux hydrographiques dans les Départements d'Outre-mer et en Méditerranée. Elle dispose à Toulon d'un échelon permanent, la Base Océanographique de la Méditerranée (BOM), chargé de préparer et exécuter les levés sur les côtes sud de France.

J'ai pris la direction et la direction technique de la MOA le 1^{er} septembre 1996 en remplacement de l'ICA Michel LE GOUIC. Le CF Francis RUBIANO, commandant du *D'ENTRECASTEAUX* et l'IPA Michel EVEN m'ont succédé le 21 août 1998, respectivement en tant que directeur et directeur technique de la mission.

1.2. Présentation de la MOA

1.2.1. Environnement hiérarchique et organisation structurelle

La MOA est constituée de quatre unités :

A Brest : - une unité hydrographique baptisée UOA. Elle comprend 45 personnes dont 7 ingénieurs et 20 officiers mariniers hydrographes (OMH). Elle dispose de locaux implantés dans le Centre Marine de La Villeneuve (CMLV) et comprend deux services : le service Océanographie-Hydrographie (OH) qui assure la préparation des levés, leur exécution à la mer et leur exploitation et le service Logistique (LOG) qui assure la gestion et la maintenance des équipements.
- le BO *D'ENTRECASTEAUX* (2 200 t, 79 personnes)
- le BH1 *L'ESPERANCE* (1 200 t, 39 personnes)

L'UOA est représentée dans les structures d'information et de participation du *D'ENTRECASTEAUX*, de *L'ESPERANCE* et du CMLV.

A Toulon : - un échelon d'accueil, la Base Océanographique de la Méditerranée (BOM), composé de 3 personnes dont un OMH. La BOM peut conduire des levés portuaires. Renforcée par du personnel de l'UOA, elle réalise les levés en Méditerranée, notamment à bord du BSR *GAZELLE* armé à l'hydrographie et mis à disposition du SHOM (service hydrographique et océanographique de la marine) pendant 60 jours par an.

Le BO *D'ENTRECASTEAUX* et le BH1 *L'ESPERANCE* sont placés sous le commandement organique du commandant de la direction du port de Brest et sous le commandement opérationnel du chef d'état-major de la marine.

L'UOA relève organiquement de l'adjoint logistique de l'amiral commandant l'arrondissement maritime de Brest. Elle

partage ses locaux au CMLV avec l'UHA, unité hydrographique de la MHA (mission hydrographique de l'Atlantique), et la BHA (base hydrographique de l'Atlantique) qui fait également partie de la MHA et est chargée d'assurer son soutien. Une certaine synergie existait dès l'origine entre les deux missions puisque le chef de la BHA est responsable, en liaison avec le commandant du CMLV, de l'entretien, de la sûreté et de la protection de l'ensemble des installations à terre qui leur sont affectées. Ce soutien de la BHA à la MOA a été formalisé dès le 28 février 1996 par un protocole qui a été remis à jour le 16 décembre 1997. Des synergies supplémentaires entre les deux missions ont été recherchées et se sont concrétisées par des travaux en commun notamment pour l'évaluation de la chaîne d'acquisition et de traitement AQIDOC - TRADOC, mais surtout par des prêts d'équipements, d'embarcations, de véhicules, etc., ou des mises à disposition de personnels. Des gains de productivité semblent possibles en rapprochant encore plus étroitement les services logistiques des deux missions.

Après deux ans et demi d'existence, il est important de tirer un premier bilan du fonctionnement de la BOM. Elle est chargée d'assurer l'exécution des travaux d'hydrographie concernant le port de Toulon et le soutien des activités hydro-océanographiques de la MOA en Méditerranée. Elle relève organiquement du commandant de la direction du port de Toulon et pour son activité du directeur de la MOA. De façon à supprimer toute ambiguïté, la structure et le fonctionnement de cette petite unité ont été précisés par un protocole d'accord signé en janvier 1997 par le directeur du port de Toulon et le directeur de la MOA. Ce protocole a donné toute satisfaction mais il s'est avéré que la charge de travail non hydrographique du chef de la BOM était plus importante que prévue. Très absorbé par le fonctionnement de l'unité (logistique, secrétariat, relations avec les différentes autorités, formation de ses adjoints, etc.), il ne peut en effet consacrer en moyenne que la moitié de son temps aux travaux purement hydrographiques.

En pratique et compte tenu du faible effectif de la BOM, les travaux réalisés en Méditerranée peuvent être classés en deux catégories :

- Travaux pouvant être réalisés sans renfort de l'UOA : il s'agit notamment des levés portuaires dans le port ou en rade de Toulon. Hormis le tracé des minutes définitives et le contrôle final, toute la rédaction est assurée par la BOM.
- Travaux nécessitant un renfort de l'UOA : il s'agit notamment des levés effectués à partir ou avec le soutien de la *GAZELLE* ou d'un autre bâtiment. Dès la fin des travaux à la mer ou sur le terrain, le dossier de rédaction est pris en charge par l'UOA.

L'expérience a montré que, malgré cette répartition et compte tenu du temps que le chef de la BOM pouvait consacrer aux travaux de rédaction, ceux-ci prenaient du retard. A partir du printemps 1998, un officier marinier hydrographe de l'UOA a donc été détaché à la BOM en renfort quasi permanent de façon à accélérer la rédaction.

1.2.2. Moyens

1.2.2.1. Personnel

Les chiffres suivants analysés ci-après donne la moyenne sur la période de l'effectif par catégorie de personnel de l'ensemble formé par l'UOA et la BOM, les catégories n'étant pas exclusives les unes des autres.

a) Ingénieurs

L'effectif moyen a été de 7.3 pour un effectif théorique de 6. Il y a eu presque en permanence un IETA hydrographe en supplément au plan d'armement. D'autre part, l'IPA LECA a été affecté en supplément pendant 5 mois avant de prendre la direction de la MHA. Il faut noter que depuis le 1^{er} juin 1998, il n'y a plus qu'un seul IETA électronicien sur les deux prévus. Le plan d'armement prévoit la suppression d'un poste d'IETA hydrographe pour l'an 2000. Le déficit par rapport à la situation moyenne connue depuis 1996 sera donc de deux ingénieurs et amoindrira le potentiel d'étude de la mission.

b) Officiers

Le plan d'armement comportait jusqu'au mois de septembre 1997 un poste d'aspirant « recherche scientifique » qui a été remplacé à cette date par un poste d'enseigne de vaisseau « commandement et service ». Ces deux postes ont été honorés pendant toute la période par la même personne qui a effectué un stage de trois semaines à l'Ecole Navale en septembre 1997 au moment de son changement de statut.

c) Major hydrographe

Le poste n'a été honoré que pendant les dix premiers mois. La fonction de chef de la salle de dessin a ensuite été assurée par un maître principal HYDROSUP.

d) Officiers mariniers hydrographes supérieurs

L'effectif moyen a été de 9.6 pour un effectif théorique de 10. Le déficit a été en moyenne de un la première année alors que le plan d'armement a été globalement respecté la deuxième année.

e) Officiers mariniers hydrographes HYDROSUP

L'effectif moyen a été de 2 pour un effectif théorique de 4.

f) Officiers mariniers hydrographes subalternes

L'effectif moyen a été de 15.8 pour un effectif théorique de 11. Les excédents les plus importants se sont produits après les sorties de cours du BS hydrographe.

g) Officiers mariniers hydrographes programmeurs

L'effectif moyen a été de 3.2 pour un effectif théorique de 3, cet effectif théorique s'étant avéré trop juste compte tenu du développement des réseaux informatiques dans les locaux à terre comme sur les bâtiments et de la mise en service de la chaîne AQIDOC - TRADOC qui s'est étalée sur les dix huit derniers mois. La gêne a été la plus forte pendant les six premiers mois de 1998 au cours desquels seulement deux programmeurs étaient présents à la MOA.

h) Officiers mariniers plongeurs

L'effectif moyen a été de 5 pour un effectif théorique de 3.

i) Officiers mariniers d'autres spécialités

L'effectif moyen et l'effectif théorique sont de 5.

j) Quartiers maîtres et matelots

L'effectif moyen a été de 15.3 pour un effectif théorique de 13. Paradoxalement, l'excédent a concerné la deuxième année alors que la professionnalisation aurait pu commencer à faire sentir ses effets.

1.2.2.2. Moyens flottants

a) D'ENTRECASTEAUX

Ce bâtiment est maintenant bien connu et n'a pas subi de modification majeure pendant la période. Son équipement a été complété dans le domaine de la sédimentologie par un sondeur de sédiments en octobre 1996 et par le système RoxAnn en novembre 1997. Le treuil d'hydrologie Mécabolier a été remplacé pendant l'IPER du début de l'année 1997 par un treuil IMECA qui a pratiquement supprimé tous les problèmes de trancannage. Une nouvelle commande a été installée sur le treuil Sea Soar qui est opérationnel depuis le mois d'avril 1997. Le guindeau électrique situé sur le pont milieu, qui est important pour la mise en œuvre des divers mouillages réalisés à l'occasion des campagnes océanographiques, est dans un état qui peut faire craindre une avarie définitive, voire un accident avec des conséquences pouvant être graves. Une procédure de remplacement a été engagée au printemps 1998. La drome qui avait été réduite en 1996 à deux vedettes hydrographiques, la troisième étant restée à Toulon pour les besoins de la BOM, a été reconstituée par l'affectation en avril 1998 de la vedette n° 2 (La Charité) de L'ESPERANCE.

La période a été marquée par une IPER avec passage au bassin qui s'est déroulée du 2 décembre 1996 au 14 mars 1997. La disponibilité du bâtiment a été relativement bonne compte tenu de son âge. Le programme d'activité a néanmoins dû être réaménagé à trois reprises :

- deux fois à cause du bouilleur qui a connu de multiples avaries : la campagne ARCANE 96 a ainsi été réduite de trois jours, alors qu'une escale technique d'une journée à Santa Cruz de Tenerife pour ravitaillement en eau a été insérée dans la campagne REGANE 96.

- La campagne ARCANE 97-4 a été réduite de deux semaines pour permettre le dépoussiérage de certains locaux contaminés par l'amiante.

Cependant, bien que cela n'ait pas eu d'incidence notable sur l'activité, les appareils de levage et notamment la grue avant dont la remise à niveau s'est achevée en mars 1998, l'échauffement de la centrale hydraulique avant, les propulseurs auxiliaires, la propulsion principale (le bâtiment a fonctionné à plusieurs reprises avec un seul moteur) et un bruit anormal sur la ligne d'arbre tribord qui s'est déclenché en sortie d'IPER et s'est résorbé avant la campagne Rapid Response 97, ont été autant de sources d'inquiétude.

Le bâtiment a été commandé successivement par les capitaines de frégate, Gérard FAUGERE jusqu'au 28 octobre 1996, Daniel MORENO jusqu'au 7 mai 1998 et Francis RUBIANO. Il a obtenu sa qualification opérationnelle à l'issue d'un stage RECO organisé par ALFAN du 10 au 14 mars 1997 en sortie d'IPER.

b) L'ESPERANCE

L'ESPERANCE a définitivement perdu ses capacités d'hydrographie côtière en mars 1997 avec le débarquement de la grue. En avril 1998, ses deux vedettes ont été affectées à l'UHA et au D'ENTRECASTEAUX.

Le programme d'entretien du bâtiment a été basé sur une hypothèse de retrait du service actif en l'an 2000. Deux IE programmées ont eu lieu pendant la période. La première s'est déroulée du 2 janvier au 21 mars 1997 et a été essentiellement consacrée à une révision des moteurs père et fils et à l'amélioration de certains locaux vie. La deuxième, du 20 février au 14 avril 1998, a suivi une période difficile du bâtiment à l'automne 1997 en raison d'avaries sur les génératrices et la propulsion, et a permis de remettre le bâtiment à niveau avant les campagnes de 1998. Elle a inclus un passage au bassin qui devrait être le dernier si L'ESPERANCE est effectivement désarmée en l'an 2000. Le précédent passage au bassin qui date du mois d'août 1996 avait été programmé pour installer le propulseur d'étrave prélevé sur L'ESTAFETTE, L'ESPERANCE ayant perdu le sien à Nantes en avril 1996. Il est à noter que cette source de pièces de rechange est en voie de tarissement.

Malgré ses problèmes mécaniques, le bâtiment a pu mener à bien toutes ses missions bien qu'il ait dû repousser sa campagne de l'automne 1997 qui s'est finalement déroulée du début novembre à la fin décembre. Il n'a pas non plus été épargné par le mauvais temps puisqu'il a dû faire face aux dépressions tropicales Lili les 26 et 27 octobre 1996 et Erica le 15 septembre 1997, ainsi qu'à une très forte tempête les 14 et 15 décembre 1997 qui l'a contraint à mettre en fuite pendant près de deux jours. Il a prouvé une fois de plus ses remarquables qualités de tenue à la mer.

Le bâtiment a été commandé successivement par les lieutenants de vaisseau Yves MERCHERZ jusqu'au 5 septembre 1997 et Olivier LEFEVBRE.

c) La GAZELLE

La disponibilité de la GAZELLE a été médiocre. En 1996, la mise à disposition initialement prévue de la mi-août à la mi-octobre a été repoussée de deux mois en raison d'une sortie d'IPER plus longue que prévue. Il a donc fallu annuler sa participation à la campagne Rapid Response 96 ainsi que le levé Sardaigne.

Le potentiel de 60 jours attribué en 1997 n'a pas pu être utilisé. Le bâtiment s'est en effet trouvé indisponible pour raisons mécaniques en mai et juin, période à laquelle avait été programmée la poursuite du levé Sardaigne, et pour cause de participation à l'exercice ANTIPOL 97 au mois de septembre. Il a alors été remplacé par la gabare de haute mer TIANEE qui a été mise à disposition de la MOA pendant tout le mois de septembre pour des levés de plageage en Corse

et qui s'est révélée bien adaptée à cette mission de soutien d'une équipe hydrographique.

La période de mise à disposition de 1998, initialement fixée de début mai à fin juin a été repoussée en raison d'une sortie d'IE plus longue que prévue du fait de mouvements sociaux ayant touché l'arsenal de Toulon. Le bâtiment a finalement pu appareiller le 13 juin et s'est consacré à la poursuite du levé au sud de la Sardaigne et à un levé de plageage en Tunisie. Il a regagné Toulon le 24 juillet.

d) Vedettes hydrographiques

Les vedettes du D'ENTRECASTEAUX et de L'ESPERANCE n'ont pas été très sollicitées et surtout n'ont pas été sollicitées toutes en même temps.

En pratique, seule la vedette hydrographique n° 3 du D'ENTRECASTEAUX (VH3) a été utilisée de façon intensive à l'occasion du levé des accès à la Vilaine (mars - avril 1997 et mai - juin 1998) et des campagnes Rapid Response 97 et 98.

La VH1 du D'ENTRECASTEAUX est restée sous cocon jusqu'au mois de juin 1997, puis a été utilisée occasionnellement en connaissant des avaries fréquentes. Cette vedette qui est le prototype des VH9 s'avère moins maniable que les vedettes de série.

La VH1 et la VH2 de L'ESPERANCE qui sont respectivement attribuées à l'UHA et au D'ENTRECASTEAUX depuis le mois d'avril 1998 ont jusqu'à cette date surtout été utilisées par la MHA. A chaque fois, la mise à disposition a été interrompue par une avarie.

En conclusion, malgré le programme de remise à niveau entrepris depuis plus d'un an des trois vedettes maintenant affectées au D'ENTRECASTEAUX, leur état général reste très préoccupant avant le déploiement en zone Antilles - Guyane du bâtiment. Pour assurer un meilleur suivi de l'état et de l'entretien de ces vedettes, un protocole a été signé en janvier 1998 entre l'UOA et le D'ENTRECASTEAUX formalisant le rôle de chacune des deux parties dans les différentes situations d'emploi des vedettes et notamment dans le cas des détachements où elles sont mises en œuvre par l'unité hydrographique sans le soutien du bord.

Bien que sa disponibilité ait été annoncée comme imminente à plusieurs reprises, la vedette attribuée à la BOM qui est affectée à la direction du port de Toulon est en fait restée indisponible pendant presque toute la période, d'abord en raison de difficultés d'approvisionnement d'un câble téléflex pour la coquille puis pour des travaux de coque. Elle n'est redevenue opérationnelle que le 23 juin 1998.

e) Drome de l'UOA et de la BOM

La période a été marquée par le déclassement des anciennes corallines de type Starvag et par leur remplacement par une nouvelle génération. Les deux anciennes corallines de la BOM qui connaissaient de gros problèmes d'étanchéité ont été désarmées respectivement en octobre 1996 et mars 1997. Le prototype de la nouvelle coralline a

été livré à l'UOA en août 1996. Cette nouvelle coralline a été testée et s'est révélée bien adaptée aux besoins après quelques modifications réalisées en janvier 1997. Elle a été affectée à la BOM en mars 1997 et est depuis régulièrement utilisée pour les levés portuaires et de plageage. Quelques soudures déficientes ont dû être refaites après les levés de plageage en Corse de septembre 1997.



La nouvelle coralline de la BOM en travaux hydrographiques.

Suite à la recette de ce prototype, une petite série a été lancée dont un des exemplaires a été attribué à l'UOA en juillet 1997. Cette coralline a depuis été utilisée essentiellement dans le cadre des campagnes Rapid Response 97 et 98 et a donné satisfaction.

Une demande a été adressée à l'autorité organique en avril 1997 pour remplacer le zodiac 6 places de l'UOA par un modèle 10 places qui serait beaucoup mieux adapté aux missions d'installation de marégraphes immergés par plongeurs. Aucune réponse n'avait encore été reçue en août 1998.

1.2.2.3. Locaux

a) UOA

L'UOA est installée depuis la création de la MOA au 1^{er} janvier 1996 dans des locaux refaits à neuf sur le site du Centre Marine de La Villeneuve. Cette infrastructure, si ce n'est son

relatif éloignement des postes à quai des bâtiments, donne entière satisfaction. L'étude d'une nouvelle implantation des missions hydro-océanographiques métropolitaines a démarré à l'été 1998 après l'annonce de la fermeture avant 2002 du Centre Marine de la Villeneuve.

b) BOM

La BOM a hérité au 1^{er} janvier 1996 d'une partie des locaux de l'ex MOM (mission océanographique de la Méditerranée). Ces locaux devant être libérés en 1998, un déménagement a été envisagé dès 1996. Le choix s'est porté sur la réhabilitation de l'ex foyer La Corvette situé sur l'îlot Castigneau. Les travaux ont débuté au début de l'année 1997 et ont été achevés en février 1998 et la BOM a pu s'installer le 16 mars 1998 dans de nouveaux locaux vastes et fonctionnels.

1.2.2.4. Véhicules

Le parc automobile de l'UOA est constitué de 5 véhicules :

- 3 de marque Peugeot (305, 405, J5) dans un bon état général,
- 1 Auverland A3, bien adapté à la mise à l'eau de la coralline sur les plans inclinés et dont les qualités tout terrain sont appréciées et indispensables pendant les missions outre-mer,
- 1 Renault Trafic vieillissant.

La BOM dispose à Toulon d'un véhicule Renault Master (code 20) qui possède le kilométrage le plus élevé et dont le remplacement est envisagé.

La 305 a été régulièrement embarquée sur le *D'ENTRECASTEAUX* et a servi de véhicule de liaison pendant les escales. Le J5 a été embarqué pendant les campagnes Rapid Response et s'est avéré très utile pour les travaux sur le terrain. La disponibilité du parc a été relativement satisfaisante et n'a pas pénalisé l'accomplissement des missions.

1.2.2.5. Hélicoptère

Un hélicoptère de type Alouette III a été embarqué à deux reprises à bord du *D'ENTRECASTEAUX* :

- un hélicoptère de la 23S embarqué à Toulon pour la campagne Rapid Response 97,



La salle de dessin des nouveaux locaux de la BOM sur l'îlot Castigneau.

- un hélicoptère de la 35F embarqué à Brest pour la campagne Rapid Response 98.

Ils ont contribué de manière significative au succès de ces campagnes. En plus des missions qui leur sont habituellement attribuées (transport de matériel et de personnel en des lieux difficiles d'accès), ils ont été utilisés à des fins plus techniques comme la prise de vues photographiques (verticales pour effectuer une couverture photogrammétrique d'une zone limitée ou obliques pour décrire un site de plageage) ou les mesures météorologiques avec le système SSBC (Système de Sondage Basses Couches). Dans les deux cas, la disponibilité a été bonne (4 jours d'indisponibilité pour 2 mois de mission au total) et l'allocation s'est révélée largement suffisante (respectivement 11.7 et 15.8 heures consommées pour un potentiel de 30 heures).

1.2.2.6. Matériel spécifique

Le matériel s'est en général révélé adapté aux missions, aussi bien d'un point de vue qualitatif que quantitatif. Les quelques difficultés rencontrées ont pu être résolues relativement facilement, et sans obérer outre mesure le déroulement des missions, grâce à la proximité de l'EPSHOM (établissement principal du SHOM) et à la qualité du soutien qu'il a apporté.

Outre le matériel qui lui était affecté en propre, la MOA a également utilisé, surtout pour ce qui concerne la localisation GPS, le matériel en pool à l'EPSHOM. Ce système de pool n'est efficace que si une planification des besoins est établie par les missions (métropolitaines) en début d'année. La proximité de la mission hydrographique de l'Atlantique a aussi permis de résoudre au cas par cas différents problèmes de disponibilité de matériel. Néanmoins, une plus grande synergie entre les services logistiques des deux missions permettrait une gestion plus efficace des équipements qui leur sont affectés.

La procédure de recueil des besoins est bien organisée. Chaque fin d'année, l'EPSHOM diffuse ainsi aux missions un programme prévisionnel d'acquisition des équipements hydro-océanographiques du SHOM pour les cinq prochaines années ainsi que le plan d'équipement des missions en leur demandant d'exprimer leurs besoins en équipements pour la période considérée. Une meilleure information des missions sur l'exploitation des besoins qu'ils ont exprimés serait néanmoins utile et pourrait se faire en diffusant aux missions le plan d'acquisition quinquennal et le plan d'équipement des missions tels qu'ils sont arrêtés après la réunion de la commission « emploi des crédits d'études et d'acquisitions d'équipements » de printemps.

Le cas particulier de la BOM mérite d'être souligné. En effet, sa dotation en matériel est conséquente au regard de la faiblesse de son effectif. Ceci peut s'expliquer en partie par l'absence d'un soutien local pour la maintenance des appareils scientifiques du SHOM nécessitant une redondance de matériel. De même, un certain nombre d'équipements de base doivent exister quel que soit le nombre de personnes constituant l'unité : c'est le cas des photocopieurs, télécopieurs, traceurs, appareils de maintenance, outillage, etc. Ainsi, lors de la création de la BOM, si le départ de trois personnes n'a eu que peu d'influence sur le besoin en équipement de l'UOA, la création d'un détachement autonome de trois personnes a créé des besoins conséquents.

Les observations particulières relatives à certains équipements scientifiques figurent au chapitre 4.

1.2.3. Administration

L'UOA est rattachée administrativement au bureau administratif du CMLV, et son personnel au bureau militaire du CMLV. Le régime administratif particulier de la BOM découle des dispositions figurant dans le protocole d'accord de janvier 1997 mentionné dans le paragraphe 1.2.1.

Comme toutes les missions hydro-océanographiques, la MOA bénéficie des crédits du SHOM pour les fonds de prévoyance (environ 25 kF par an) et les frais de déplacement (150 à 180 kF par an). L'UOA et la BOM disposent par ailleurs de divers crédits de fonctionnement pour assurer l'entretien et la réparation du matériel marine (y compris les véhicules) ainsi que des locaux à terre (régime des masses du CMLV et de la DP Toulon, activité 70 EM, crédit en valeur DCN). Les équipements spécifiques sont entretenus par le SHOM. Bien que compliquant un peu la gestion administrative quotidienne, cette multiplicité des sources offre une souplesse appréciable.

2. TRAVAUX RÉALISÉS

Tous les travaux énoncés ci-dessous ont fait l'objet de rapports particuliers dont la liste est donnée en annexe A. La répartition des 8 600 unités d'œuvre d'OMH consommées pendant la période est donnée pour chaque type de travaux. Il faut également mentionner les travaux de rédaction du levé à Mayotte du chenal entre la passe Bandélé et les passes Saziley (réalisé en 1995) qui se sont achevés en juin 1997 et ont absorbé 5 % de ce potentiel d'unités d'œuvre (cf. planche 1).

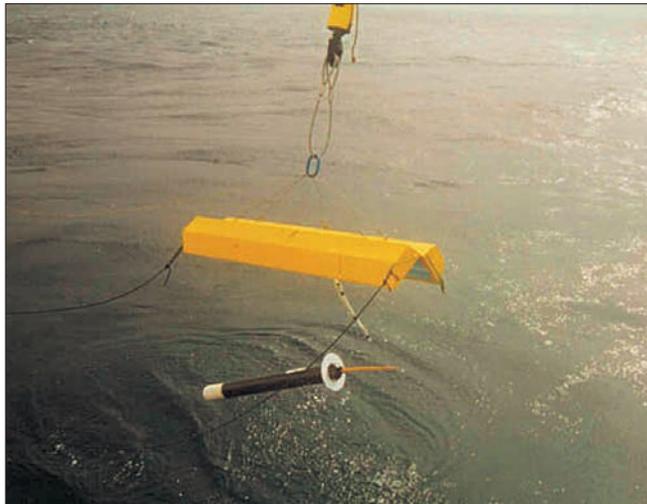
2.1. Campagnes océanographiques

Ces campagnes dont les objectifs et les résultats principaux sont détaillés ci-après n'ont concerné que le *D'ENTRECAS-TEAUX* dont elles ont constitué 52 % de l'activité pendant la période, soit un total de 107 jours de mer et de 19 jours d'escale. D'autre part, les pourcentages d'unités d'œuvre du personnel OMH qui y ont été consacrés s'élèvent à 3 % pour les travaux de préparation ou de rédaction et à 5 % pour les travaux d'exécution. Quelques réflexions sur l'organisation de ces campagnes, dans leurs phases de préparation, de réalisation et d'exploitation, et notamment sur le partage des tâches et des responsabilités entre les différents intervenants (responsable scientifique, EPSHOM avec le bureau Campagnes à la Mer et le service Instrumentation Scientifique, UOA et bord) figurent au chapitre 5.

2.1.1. Campagnes ARCANE (Action de Recherche sur la Circulation océanique en Atlantique nord-est)

ARCANE est un programme pluriannuel conduit dans le cadre de la coopération entre le SHOM et l'Ifremer avec la participation d'autres partenaires français et étrangers. L'objectif est l'étude de la circulation océanique sur la pente continentale et de la circulation aux latitudes moyennes de l'Atlantique nord-est, ainsi que des liens entre ces deux circulations.

La première campagne de ce programme a eu lieu du 26 août au 3 octobre 1996 et a permis au *D'ENTRECASTEAUX* d'ensemencer la zone d'étude de 41 flotteurs lagrangiens de type Marvor.



Mise à l'eau d'une bouée MARVOR à partir du *D'ENTRECASTEAUX*.

Le bâtiment a été impliqué à trois reprises dans ce programme au cours de l'année 1997. La campagne ARCANÉ 97-2 du 1^{er} au 27 avril a été essentiellement consacrée au remplacement de plusieurs lignes courantométriques et à l'étude hydrologique d'un meddy. La campagne ARCANÉ 97-4 du 18 au 27 juin l'a vu mettre en œuvre pour la première fois de façon opérationnelle le poisson remorqué Sea Soar. Le bâtiment a été enfin sollicité entre le 20 et le 23 octobre pour récupérer une ligne de mouillage courantométrique à la dérive au large du cap Finistère.

Plusieurs lignes courantométriques et sources acoustiques ont été renouvelées pendant la campagne ARCANÉ 98-2 du 20 avril au 3 mai 1998 au cours de laquelle le *D'ENTRECASTEAUX* a retrouvé et poursuivi l'étude hydrologique du meddy déjà investigué en 1997.

2.1.2. Campagne MODYCOT 97-1 (Modélisation Dynamique COTière)

Cette courte campagne réalisée à partir du *D'ENTRECASTEAUX* du 27 au 30 juin 1997 s'inscrit dans le cadre du programme MODYCOT conduit en collaboration avec l'Ifremer et a consisté à établir un réseau hydrologique par bathysonnage sur le plateau continental armoricain dans le but de mieux comprendre, à partir de mesures en mer, mais aussi grâce à la modélisation, la variabilité océanique dans cette zone.

2.1.3. Campagne EVA 97 (Evaluation de la Variabilité Acoustique)

L'étude des interactions des ondes acoustiques basse fréquence avec l'environnement a constitué l'objectif principal de cette campagne menée en collaboration avec le GESMA et le CTSN. Quatre journées de mer du *D'ENTRECASTEAUX* y ont été consacrées du 12 au 16 octobre 1997 et

cela a été l'occasion de mettre en œuvre une bouée de réception acoustique de type Télémaque et la source remorquée déjà utilisée pendant la campagne INTIMATE 96.

2.1.4. Campagne INTIMATE 98 (INternal Tides Investigations by Means of Acoustic Tomography Experiment)

Le *D'ENTRECASTEAUX* n'a pas été directement impliqué dans cette campagne d'investigation des ondes internes à partir de la tomographie acoustique mais a participé ainsi que *L'ESPERANCE*, à l'occasion de diverses missions réalisées entre novembre 1997 et avril 1998, au levé de la zone d'étude. La plupart des techniques disponibles à la MOA ont été mises en œuvre : sondeur latéral, sondeur de sédiments, système RoxAnn, imagerie SMF, prélèvements à la benne et carottages.

2.1.5. Campagne PRECOCE 98-3 (PREdiction des Couches superficielles de l'Océan le long des Côtes Européennes)

L'objectif des campagnes PRECOCE s'inscrivant dans le cadre du développement exploratoire MINT (Marée INterne) est de montrer que des mesures océanographiques peuvent être acquises et utilisées de façon opérationnelle et de valider un modèle de prévision du comportement de la thermocline saisonnière et de la couche de mélange océanique. Du 10 juin au 1^{er} juillet 1998, le *D'ENTRECASTEAUX* a ainsi mis en place deux mouillages fixes de chaînes de thermistances et effectué des observations hydrologiques et courantométriques d'une durée de 25 heures (multiple de la période de marée semi-diurne) en différents points d'une radiale perpendiculaire au plateau continental armoricain.

2.1.6. Campagnes Brittany

Ces deux courtes missions du *D'ENTRECASTEAUX* ne sont pas à proprement parler des campagnes océanographiques. Elles se sont déroulées du 23 au 25 octobre 1997 et du 11 au 14 mai 1998 et ont consisté à assurer la maintenance de la bouée météorologique Brittany située à l'ouest du haut-fond de la Chapelle, c'est-à-dire à remplacer les différents capteurs. Il est à noter que ce genre de mission est plutôt du ressort d'un bâtiment de servitude. D'autre part, compte tenu des contraintes météorologiques (houle inférieure à 2 mètres) imposées par l'intervention sur la bouée, il a été décidé de les coupler avec d'autres activités et notamment avec des essais de différents équipements, aspect évoqué dans le chapitre 4, ce qui a permis de choisir le moment favorable pour l'intervention.

2.2. Campagnes bathymétriques et géophysiques hautes

2.2.1. Levés bathymétriques et géophysiques en Atlantique nord

L'ESPERANCE y a consacré la quasi-totalité de son activité (95 %) de la période, soit un total de 202 jours de mer et 33 jours d'escale, à l'occasion de quatre campagnes :

- campagne Açores 96-2 du 10 septembre au 6 novembre 1996 ;

- campagne GEOCAN 97 du 13 mai au 2 juillet 1997 ;
- campagne Açores 97 du 11 septembre au 1^{er} octobre et du 5 novembre au 20 décembre 1997 ;
- campagne BAGEANE 98-1 du 29 avril au 30 juin 1998.

Pendant ces campagnes, le bâtiment a mis systématiquement en œuvre son sondeur multifaisceau grands fonds Simrad EM12 avec acquisition des données bathymétriques et d'imagerie, le sondeur de sédiments avec acquisition numérique des données par le système Delph, le gravimètre KSS30 et le magnétomètre SMMII, la disponibilité de ce dernier n'ayant pas été totale en raison de divers problèmes tant sur le câble que sur le poisson.

Le *D'ENTRECASTEAUX* a quant à lui effectué deux campagnes géophysiques à dominante gravimétrique (14 % de son activité, soit 31 jours de mer et trois jours d'escale) :

- campagne REGANE 96 du 20 octobre au 14 novembre 1996 ;
- campagne REGANE 97 du 12 au 19 novembre 1997 pendant laquelle des levés sédimentologiques préliminaires à la campagne océanographique INTIMATE 98 ont également été réalisés.

Les pourcentages d'unités d'œuvre du personnel OMH consacrés à ces campagnes géophysiques s'élèvent à 28 % pour les travaux de préparation ou de rédaction et à 7 % pour les travaux d'exécution.

2.2.2. Levé bathymétrique entre la Sardaigne et la Sicile (cf. planche 2)

Ce levé commencé en 1988 n'a que peu progressé en raison du taux de disponibilité de la *GAZELLE* (cf. § 1.2.2.2.c). Les campagnes programmées en 1996 et en 1997 ont dû être annulées alors que celle de 1998 a été raccourcie.

2.2.3. GEBCO

Tous les transits hauturiers des bâtiments ont été valorisés par l'acquisition systématique de données bathymétriques et géophysiques qui ont été traitées et groupées par année avant d'être adressées à l'EPSHOM.

2.2.4. Participation aux campagnes réalisées par des navires extérieurs au SHOM

a) A bord du *MARION DUFRESNE II*

Dans le cadre du protocole d'accord entre le Ministre de la défense et l'Institut Français pour la Recherche et la Technologie Polaires (IFRTP), préparé par la MOA et signé le 21 octobre 1996 par les directeurs du SHOM et de l'IFRTP, plusieurs appelés du contingent de l'UOA ont participé à six campagnes à dominante géophysique à bord du *MARION DUFRESNE II*. Ils ont également été impliqués dans les premiers essais du sondeur multifaisceau grands fonds SeaFalcon 11 de ce bâtiment puis dans son utilisation opérationnelle. Les campagnes concernées qui ont fait chacune l'objet d'un compte rendu (cf. annexe A) sont :

- campagne « Image 2 - Nausicaa » du 18 septembre au 26 octobre 1996 dans le sud de l'océan Indien et de l'océan Atlantique, essentiellement consacrée à des carottages et à des essais du sondeur multifaisceau grands fonds SeaFalcon 11 ;

- campagne de carottage « Image 3 - Iphis » du 14 avril au 2 juillet 1997 dans le sud de l'océan Indien et dans le sud-ouest de l'océan Pacifique ;

- campagne « Fuji » du 7 octobre au 3 novembre 1997 consacrée à l'étude de la dorsale sud-ouest indienne ;

- campagne océanographique « Minerve - Nivmer - Hydrocro » du 6 janvier au 17 février 1998 dans le sud de l'océan Indien ;

- campagne géophysique « Kerimis » du 21 février au 27 mars 1998 autour des îles Kerguelen ;

- campagne de carottage « Image 4 » du 18 juin au 15 juillet 1998.

b) A bord de l'*ATALANTE*

Le premier maître hydrographe PERCHOC de l'UOA a participé, en tant que chef de quart au PC scientifique, à la campagne ZEE Gascogne 2 qui s'est déroulée à bord de l'*ATALANTE* du 18 mai au 9 juin 1997. Cette participation, formalisée par le protocole d'accord n° 97/1 entre le SHOM et l'Ifremer, a fait l'objet d'un compte rendu mentionné en annexe A.

2.3. Campagnes Rapid Response

Un des points forts de l'activité de la MOA pendant ces deux années a été sa participation aux campagnes Rapid Response 96, 97 et 98. L'objectif de ces campagnes menées dans un cadre OTAN était de tester des procédures d'évaluation rapide de l'environnement (Rapid Environmental Assessment : REA), c'est-à-dire d'évaluer les capacités et les conditions d'un soutien en environnement de forces alliées dans un contexte de préavis court et pour les domaines de lutte amphibie (Amphibious Warfare : AW), de guerre des mines (Mine Warfare : MW) et de lutte acoustique sous-marine (Acoustic Submarine Warfare : ASW). Le *D'ENTRECASTEAUX* y a consacré 32 % de son activité de la période, soit un total de 57 jours de mer et 23 jours de mouillage ou d'escale. Les pourcentages d'unités d'œuvre du personnel OMH consacrés à ces campagnes s'élèvent à 3 % pour les travaux de préparation ou de rédaction et à 4 % pour les travaux d'exécution.

2.3.1. Campagne Rapid Response 96

Cette campagne a été programmée dans le sud de la Sardaigne et de la Sicile pour permettre le recueil et l'analyse d'observations d'environnement en soutien de l'exercice militaire annuel Dynamic Mix du Commandant en Chef des Forces Alliées du Sud de l'Europe. La participation maritime française devait être assurée par le BSR *GAZELLE* qui n'a pas pu être présent en raison d'une sortie d'IPER différée à plusieurs reprises pour finalement être retardée de

près de quatre mois. La MOA a néanmoins participé à cette campagne grâce à l'embarquement de l'IPA Laurent KERLEGUER sur le NRV *ALLIANCE* du 31 août au 13 septembre 1996. Responsable des observations hydrologiques, il a pu par ailleurs tirer divers enseignements qui ont été utiles pour les campagnes suivantes, dont notamment l'adaptation du BSR *GAZELLE* aux travaux envisagés compte tenu des états de mer rencontrés et de la nécessité de disposer de moyens de traitement embarqués.

2.3.2. Campagnes Rapid Response 97 et 98

Le *D'ENTRECASTEAUX* équipé d'un hélicoptère de type Alouette 3 et de sa drome hydrographique a participé à ces deux campagnes, respectivement du 12 août au 26 septembre 1997 et du 2 février au 6 mars 1998.

a) La campagne Rapid Response 97 programmée en soutien de l'exercice Dynamic Mix 97 s'est déroulée pour le *D'ENTRECASTEAUX* en mer Ionienne où il a effectué des mesures d'hydrologie et en baie de Kiparissia sur la côte ouest du Péloponnèse pour le levé d'une zone de débarquement réalisé en étroite collaboration avec le HMS *ROEBUCK*, navire hydrographique britannique. L'hélicoptère s'est révélé un outil très bien adapté à ce type d'opération et a permis d'effectuer en particulier un levé photogrammétrique du site de plageage.



HMS *ROEBUCK* à couple du BO *D'ENTRECASTEAUX* en escale à Pylos durant la campagne Rapid Response 97.

b) Le golfe de Cadix a été choisi comme cadre de la campagne Rapid Response 98 programmée en soutien de l'exercice Strong Resolve 98. Les travaux réalisés par le *D'ENTRECASTEAUX* ont été de même nature que ceux de l'année précédente. Il convient néanmoins de souligner :

- La désignation d'un OTC (Officer in Tactical Command) remplaçant en quelque sorte le coordinateur militaire des précédentes campagnes.

- Les conditions météorologiques moins favorables. La campagne a été programmée en hiver, contrairement aux deux précédentes qui ont eu lieu en été, de façon à démontrer la faisabilité du concept dans toutes les conditions. Le vent a en effet été très soutenu, ce qui s'est traduit par une moindre

utilisation de la drome au profit de levés réalisés directement par le bâtiment.

- La participation du *D'ENTRECASTEAUX* à l'expérimentation « environnement et lutte au dessus de la surface » (LASR98). Le bâtiment a procédé à des lâchers de ballons-sondes et à des vols d'hélicoptère équipé du système de sondage basse couche aéroporté (SSBC).

Les méthodes originales ou parfois innovantes utilisées notamment pour le levé de plage sont décrites dans le chapitre 4.1.2. D'autre part, une caractéristique importante de ces campagnes a été la nécessité de fournir rapidement des produits numériques utilisables par les forces impliquées dans les exercices Dynamic Mix 97 et Strong Resolve 98. Cet objectif a pu être atteint, aussi bien au niveau de l'élaboration des produits, avec la chaîne HYTRAI pour le levé bathymétrique, le logiciel Cartosed pour les données sédimentologiques, le tableur Excel pour les gradients de plage, le logiciel Seasoft pour les bathysondages, que pour la transmission des données grâce à une liaison numérique par un téléphone cellulaire dont la portée limitée à 30 km des côtes s'est finalement révélée assez peu contraignante pour le *D'ENTRECASTEAUX* qui était amené à travailler le plus souvent près du littoral.

L'éventail des domaines de luttes concernés (amphibie, anti-sous-marine, guerre des mines) a donc conduit le *D'ENTRECASTEAUX* à mettre en œuvre une gamme très étendue de ses moyens et à travailler en liaison étroite avec des navires étrangers. Le bilan est donc plutôt positif, mais les moyens disponibles restent probablement à compléter, notamment par des techniques de télédétection (un levé bathymétrique par laser aéroporté a par exemple été réalisé par un avion canadien pendant la campagne Rapid Response 98) car le déploiement de navires hydro-océanographiques pourrait être hasardeux dans des situations conflictuelles difficiles. Le problème des communications, que ce soit au niveau de la permanence, de la fiabilité ou de la protection des informations transmises, doit également faire l'objet d'une réflexion. Enfin, l'élaboration des produits doit encore être améliorée pour répondre au mieux aux divers besoins qui sont ou seront exprimés. Le retour d'expérience en a montré les limites actuelles. D'un contenu général très intéressant pour les besoins de planification, ils s'avèrent parfois ou trop riches (insuffisamment synthétisés), ou à l'opposé à des échelles spatiales et temporelles insuffisantes, pour une utilisation tactique à bord de bâtiments en opérations. Une réflexion plus approfondie devra être menée (et le sera effectivement dans le cadre du programme d'étude amont REA conduit par l'EPSHOM) entre les utilisateurs et les concepteurs de produits d'environnement.

2.4. Levé des accès à la Vilaine (cf. planche 3)

La MOA a effectué du 20 mars au 3 mai 1997 le levé des accès à la Vilaine. Ce levé, destiné à compléter les levés réalisés depuis 1991 par la mission hydrographique de l'Atlantique entre la presqu'île de Quiberon et Le Croisic, vise à assurer un accès sûr à la Vilaine et aux ports en amont par la Passe de la Grande Accroche et à proposer une voie alternative passant par l'ouest de l'île Dumet. Le levé des accès aux ports de Piriac-sur-Mer et Mesquer éga-

lement programmé dans ce cadre n'a pas pu être réalisé en 1997 faute de temps et a finalement été mené à bien du 4 mai au 11 juin 1998. Les pourcentages d'unités d'œuvre du personnel OMH consacrés à ces levés s'élèvent à 5 % pour les travaux de préparation ou de rédaction et à 4 % pour les travaux d'exécution.

Les levés côtiers sur les côtes métropolitaines ne sont pas de la vocation de la MOA. La réalisation de ces levés s'est néanmoins révélée très profitable car elle a permis de varier l'activité et surtout de maintenir la compétence de la mission en hydrographie côtière entre deux campagnes outre-mer.

2.5. Recherche d'épaves et d'obstructions sur les côtes françaises de la Méditerranée

Ces travaux sont régulièrement inscrits au programme de la MOA. Le concours des chasseurs de mines basés à Toulon a également été régulièrement demandé pour réaliser des recherches et investigations ponctuelles à l'occasion de missions d'entraînement ou d'exercices. Malgré les contacts directs établis avec la division opérations de la flottille de la Méditerranée qui emploie les chasseurs de mines, aucune recherche n'a pu être effectuée dans ce cadre en raison du programme très chargé de ces bâtiments. Cependant, la *GAZELLE*, dont les deux mois de disponibilité hydrographique de l'année 1996 ont été repoussés à l'automne en raison d'une sortie d'IPER retardée, a pu s'y consacrer dans des conditions météorologiques particulièrement difficiles. Les avaries ne l'ont pas épargnée si bien que seulement treize journées de mer ont été dédiées à ces recherches. Onze épaves (cinq dans le golfe de Fréjus, et aux abords de Porquerolles et cinq aux abords de La Ciotat) ont pu être investiguées pendant cette mission.

2.6. Levés portuaires à Toulon

La BOM a pour mission permanente d'effectuer, en fonction des besoins exprimés, des levés hydrographiques ponctuels dans le port militaire et en rade de Toulon. Les travaux suivants ont été réalisés du mois de septembre 1996 au mois d'août 1998 :

- achèvement en septembre 1996 du levé du mole d'armement à la Seyne (levé régulier réalisé en juin 1996) ;
- contrôle d'obstructions par plongeurs aux abords du quai d'honneur (complément du levé réalisé en février et juin 1996) ;
- levé de l'appontement pétrolier du Lazaret à Saint-Mandrier, levé régulier en avril et mai 1997 et recherches d'obstructions en janvier et mai 1998, le grand laps de temps nécessaire à l'achèvement de ce levé étant en grande partie expliqué par le fort taux d'occupation de ce quai le rendant indisponible pour des travaux hydrographiques ;
- levé aux mois d'avril et mai 1998 des abords du quai Milhaud 6 en préalable à une importante opération d'infrastructure visant à augmenter ses dimensions.

Ces travaux hydrographiques ont été mis à profit pour rattacher au réseau géodésique RGF 93, au moyen d'un couple de récepteurs GPS Ashtech bifréquence, un certain nombre de points géodésiques stationnés couramment dans la région de Toulon.

2.7. Levés de plageage en Méditerranée

Quatre levés de plageage étaient inscrits au programme 1996 de la BOM. Trois avaient pu être réalisés en avril 1996 avec le soutien du BSHM *ALBACORE*. Le dernier, concernant la plage de Valras, avait dû être différé en raison de mauvaises conditions météorologiques. Il a finalement pu être effectué du 9 au 13 juin 1997 par le personnel de la BOM à partir de la coralline transportée sur le site par voie routière.

Les quatre nouvelles plages dont le levé a été prévu au programme 1997 sont situées sur la côte est de Corse. Un détachement de la BOM renforcé par du personnel de l'UOA a bénéficié à cette occasion du soutien logistique de la gabare de mer *TIANEE* qui a remplacé la *GAZELLE* dont le concours a dû être annulé en raison de la participation de ce bâtiment à l'exercice *ANTIPOL 97*. Il est à noter qu'un officier marinier hydrographe britannique a participé à cette mission en Corse qui s'est déroulée du 1^{er} au 30 septembre 1997 et pendant laquelle les plages de Solenzara, Favone, Pallombagia et San Ciprianu ont été levées. Pour la première fois, et à titre d'essai, les travaux ont été réalisés dans le réseau géodésique RGF 93 associé à la projection Lambert 93. Les coordonnées de tous les points géodésiques et amers retrouvés ou créés dans les zones de levé ont été calculées dans le réseau géodésique RGF 93 ainsi que dans le système NTF, les rattachements nécessaires ayant été assurés par des mesures GPS Ashtech bifréquence.



Coralline en sondage sur le site de plageage de Pallombagia.

2.8. Participation à des levés réalisés dans des eaux étrangères

2.8.1. Levé de plageage au Pays de Galles (opération Green Wader)

Dans le cadre de la coopération franco-britannique en hydrographie et océanographie militaires (groupe de travail JWGHO), des échanges de personnels entre officiers marins hydrographes français et britanniques ont été organisés à l'occasion de levés de plageage réalisés par les deux services pendant l'année 1997. Le maître hydrographe BOULAUD a ainsi participé du 17 au 29 août, dans un contexte opérationnel, au levé de la plage de Newquay au Pays de Galles tandis que l'hydrographe britannique Peter HAWKINS était intégré en septembre 1997 à l'équipe d'hydrographes français impliqués dans les levés de plageage en Corse (cf. paragraphe 2.7).



Détermination du gradient de la plage de Newquay au Pays de Galles par une équipe d'hydrographes britanniques.

2.8.2. Levés de plageage en Tunisie

Dans le cadre de la coopération franco-tunisienne, la MOA a été sollicitée en 1997 pour participer à un levé de plageage en Tunisie. Des difficultés d'organisation ont réduit cette première participation à une mission en Tunisie du 1^{er} au 8 septembre 1997 de deux officiers mariners hydrographes de l'UOA, pendant laquelle ils ont pu participer à un levé de plageage aux abords du cap Serrat, mais surtout se rendre compte des méthodes et matériels utilisés par les tunisiens et également apporter leur concours au dépannage de différents matériels.

Cette coopération s'est développée en 1998 : la *GAZELLE* a en effet passé huit jours dans les eaux tunisiennes du 26 juin au 3 juillet au cours desquels un levé de plageage a été réalisé en étroite collaboration avec le service hydrographique tunisien. Ce levé devrait faire l'objet d'une rédaction commune.

2.9. Travaux sur convention

2.9.1. Monaco

La BOM a été sollicitée par l'association monégasque pour la protection de la nature au mois de mai 1997 pour réaliser le maillage de la réserve sous-marine protégée du Larvotto à Monaco. Une convention onéreuse a été préparée par la MOA et a été adressée le 7 novembre 1997 par la direction du SHOM au demandeur qui, compte tenu notamment d'une modification géographique de la zone, n'avait pas encore signé cette convention le 21 août 1998.

2.9.2. Embouchure du Var

Début 1998, le SHOM a été sollicité par un collège d'experts désigné par le tribunal administratif de Nice pour effectuer un levé bathymétrique de l'embouchure du Var destiné à quantifier les risques générés par une nouvelle crue éventuelle de ce fleuve après celle survenue en novembre 1994. Une convention onéreuse a été préparée par la MOA et adressée le 3 avril 1998 par la direction du SHOM au demandeur qui ne l'avait pas encore signée le 21 août 1998.

2.10. Concours divers apportés à l'EPSHOM

2.10.1. Mise en place de Marégraphes Côtiers Numériques (MCN)

La BOM a apporté son concours au personnel de l'EPSHOM pour installer des MCN à Toulon et Nice les 10 et 11 mars 1998. Par la suite, les nivellements géométrique et GPS des deux observatoires, les contrôles périodiques de tirant d'air pendant la période de comparaison avec des marégraphes immergés ont également été confiés à la BOM.

2.10.2. Campagne de gravimétrie absolue à Brest

Dans le cadre d'une campagne de gravimétrie absolue qui s'est déroulée à Brest à la fin du mois de mars 1998, deux officiers mariners hydrographes de la MOA ont participé à l'installation du gravimètre absolu dans l'enceinte de l'EPSHOM (les mesures avec cet instrument ont eu lieu du 26 au 31 mars) et ont matérialisé diverses stations gravimétriques dans le port militaire qui ont été rattachées au point de référence créé à l'EPSHOM.

3. CONTRACTUALISATION DES PROGRAMMES

Compte tenu notamment du resserrement général des moyens, des techniques de contrôle de gestion ont été introduites progressivement dans le suivi de l'activité des missions hydro-océanographiques. Les années 1996 et 1997 ont été consacrées à la définition des bases de cette contractualisation entre la direction du SHOM et les missions. L'année 1998 a été celle de sa mise en pratique. Les objectifs de la MOA pour l'année 1998 ont ainsi été adressés à la direction au mois de décembre 1997. Ils ont été complétés en avril 1998 pour tenir compte des remarques effectuées, et approuvés. Le 21 août 1998, lors du changement de directeur et de directeur technique, ces objectifs étaient dans l'ensemble atteints. Seule la rédaction du levé des accès à la Vilaine avait pris un retard significatif par rapport aux prévisions. Ce retard s'explique par la sous-estimation coutumière de la complexité de la rédaction des levés bathymétriques côtiers avec mise en œuvre du sondeur latéral et du magnétomètre (complexité accrue par le choix de réaliser les levés de 1998 avec la chaîne AQIDOC – TRADOC encore mal connue du personnel) et par la difficulté de maintenir de façon continue le personnel ayant participé au levé sur la rédaction compte tenu des autres activités de la mission et des indisponibilités accidentelles.

4. MÉTHODES ET TECHNIQUES

4.1. Géodésie et topographie

4.1.1. Systèmes géodésiques

Sur les côtes métropolitaines, le système géodésique NTF, devenu obsolète avec l'avènement du GPS en mode géodésique, doit être progressivement abandonné au profit du réseau géodésique RGF 93, associé à la projection Lambert 93. La MOA a anticipé ce changement en effectuant, chaque fois que possible, l'acquisition des positions des levés

côtiers métropolitains localisés par méthodes GPS dans le réseau géodésique RGF 93. Cela a notamment été le cas pour le levé des accès à la Vilaine du printemps 1997 et du printemps 1998 et pour les levés de plageage en Corse de septembre 1997. Dans le premier cas, les documents ont été néanmoins rédigés dans le système NTF de façon à ce qu'ils puissent être exploités plus facilement en relation avec les levés antérieurs. Il convient de noter que le levé de 1998 a été réalisé avec une acquisition AQIVED et donc avec un traitement TRADOC ne permettant pas de travailler dans un autre système géodésique que celui de l'acquisition. Les positions DGPS fournies dans le réseau géodésique RGF 93 par le récepteur Sercel NR103 ont donc été transformées en temps réel par AQIVED dans le système NTF. Les levés de plageage en Corse ont été rédigés dans le réseau RGF 93 associé à la projection Lambert 93. Dans les deux cas, il sera donc possible, en cas de besoin, d'obtenir, soit directement, soit par simple transformation et sans dégradation par rapport à l'acquisition initiale, toutes les données de ces levés dans le réseau géodésique RGF 93. Les levés effectués dans le port et la rade de Toulon avec le système Axyle ont fait l'objet d'une acquisition et d'une rédaction dans le système NTF. Cependant, tous les points utilisés ont été rattachés au réseau géodésique RGF 93 (cf. paragraphe 2.6).

4.1.2. Méthodologie REA (Rapid Environmental Assessment)

Le concept REA implique d'acquérir des données d'environnement en un temps relativement court dans une zone quelconque, ne faisant l'objet d'aucune attention particulière au préalable. On a donc considéré pour les campagnes Rapid Response qu'on ne disposait d'aucune information sur les régions étudiées. Une méthodologie a donc été mise au point pour présélectionner le site le mieux adapté à une opération de débarquement et pour disposer rapidement d'un réseau géodésique pouvant servir de base aux travaux bathymétriques et topographiques.

a) Les premiers travaux sont réalisés à l'EPSHOM et consistent à faire une première exploitation de l'imagerie satellitaire SPOT ce qui permet de sélectionner une zone de plageage a priori favorable, tant du point de vue terrestre (présence de voies de dégagement, à l'écart des zones inondables, etc.) que maritime (absence de grosses constructions, fond de sable, etc.).

b) Une reconnaissance rapide sur le terrain permet alors de confirmer l'intérêt de la zone et d'effectuer quelques travaux de géodésie, et notamment de positionner un point de référence pour tous les travaux à suivre. Grâce au GPS différentiel avec corrections transmises par satellite (système Seastar ou Landstar, cf. paragraphe 4.2), il est possible de créer un tel point en quelques minutes seulement avec une précision absolue estimée meilleure que le mètre.

c) L'hélicoptère peut alors effectuer un vol photogrammétrique du site ainsi que quelques clichés numériques. Tandis que les films sont expédiés vers l'EPSHOM pour le développement et la restitution, les clichés numériques peuvent être traités à bord pour constituer une mosaïque utilisée comme une carte par l'équipe chargée de compléter la géodésie et de positionner par GPS les points de calage nécessaires à l'exploitation des photographies et au traitement final de l'image SPOT. Ces éléments qui se présentent sous forme

numérique peuvent être adressés à l'EPSHOM par courrier électronique, si bien que le délai entre le levé photogrammétrique et la restitution a été limité à une semaine. Cette durée pourrait encore être réduite en utilisant une caméra photogrammétrique numérique qui permettrait de supprimer les délais d'expédition et de développement des films.

d) La topographie de la plage (mesures de gradients) et le levé des très petits fonds (jusqu'à 1 mètre pour assurer le recouvrement avec le levé réalisé par embarcation) sont alors effectués par une équipe de trois personnes à l'aide du GPS cinématique en temps réel qui assure une précision centimétrique horizontalement comme verticalement. En l'absence de GPS cinématique, ce qui a été le cas de la BOM pour tous les levés de plage qu'elle a réalisés, il est possible de dégrader la méthode (précision et rapidité moindres) en combinant des mesures DGPS UHF (précision métrique) pour les coordonnées horizontales avec des mesures de nivellement pour les coordonnées verticales.

4.2. Localisation

La localisation GPS en mode différentiel est restée un sujet permanent d'étude. Plusieurs systèmes avec transmission des corrections par satellites permettant une localisation jusqu'à une grande distance des stations différentielles ont été évalués puis utilisés de façon opérationnelle :

a) système DGPS Landstar utilisé pendant la campagne Rapid Response 97 (cf. annexe A, § 2) ;

b) système DGPS Seastar utilisé pendant les campagnes Rapid Response 98 et Sardaigne 98 (cf. annexe A, § 2) ;

c) système DGPS multi-références Multifix utilisé à bord de *L'ESPERANCE* (cf. annexe A, § 2) ;

d) système DGPS Starfix et produits multi-références associés VBS et Seadiff évalués à bord du *D'ENTRECASTEAUX* (cf. annexe A, § 2), le système VBS étant maintenant utilisé de façon opérationnelle sur ce bâtiment.

Jusqu'au printemps 1997, les systèmes GPS en mode différentiel utilisés pour les levés côtiers à la MOA assuraient au mieux une précision métrique et étaient donc limités aux levés d'échelle inférieure ou égale au 1/1 000. C'est le cas du système DGPS UHF de Sercel (station NDS100) utilisé encore couramment. Un gain de précision important est apporté par les systèmes cinématiques temps réel exploitant les mesures de phase et permettant les résolutions d'ambiguïtés en mouvement. La mission a donc évalué en mai 1997 (cf. annexe A, § 2) le système mono-fréquence Kart de Sercel dont la rapidité de résolution des ambiguïtés est limitée et le système bi-fréquence Ashtech qui a finalement été retenu et utilisé pendant les campagnes Rapid Response où il a montré tout son intérêt dans un cadre de REA (Rapid Environmental Assessment). Ce même système a fait l'objet de nouveaux essais en avril 1998 (cf. annexe A, § 2) visant à évaluer la possibilité de déduire en temps réel le signal de marée des positions verticales mesurées à partir d'une vedette. Les résultats ont montré que le signal obtenu après filtrage des fréquences élevées n'était pas exactement celui de la marée, mais qu'il s'y superposait l'enfoncement de la vedette en fonction de la vitesse. L'utilisation du GPS cinématique temps réel pour les levés bathymétriques permettrait donc d'améliorer non seulement la précision de la loca-

lisation de l'embarcation mais aussi la précision de la réduction des sondages car la réduction classique déduite des mesures obtenues par un marégraphe ne tient pas compte de cet enfoncement variable de la vedette.

D'autre part, un récepteur GLONASS développé par la société Ashtech a été embarqué pour évaluation en fin d'année 1997 sur *L'ESPERANCE*.

La datation des informations de localisation a constitué un thème de réflexion : le décalage entre l'heure de validité de la position fournie par un récepteur GPS NR103 et l'heure du message délivré par sa sortie numérique a ainsi été évalué (cf. annexe A, § 2). C'est un élément à prendre en compte dans les chaînes d'acquisition des données.

Un capteur d'attitude DMS05 a été embarqué durant la campagne Açores 96-1 de *L'ESPERANCE*. Ses performances ont été évaluées par comparaison à la centrale inertielle Microcin au moyen de l'outil de calcul et de visualisation Matlab (cf. annexe A, § 2). Cette évaluation et d'autres tests ont permis de démontrer que ce capteur était susceptible de remplacer les centrales Heco 10 et Heco 10 RS sur les bâtiments hydrographiques. D'autre part, une réflexion sur la définition des angles d'attitude de la Microcin et du sondeur multifaisceau Simrad EM12 Dual a été menée en collaboration avec l'EPSHOM.

4.3. Bathymétrie

Les performances du sondeur petits fonds Simrad EA 300P ont été analysées et comparées à celles d'un sondeur DESO 20 après qu'un nouveau système d'acquisition destiné à limiter les erreurs de datation ait été développé (cf. annexe A, § 2). Les capacités de détection d'obstructions de faibles dimensions du sondeur Simrad se sont révélées moindres que celles du sondeur DESO 20.

La chaîne de traitement du sondeur multifaisceau grands fonds Simrad EM12 Dual a connu de profondes évolutions relatées dans le chapitre 4.6.

4.4. Géophysique

4.4.1. Gravimétrie

La gravimétrie a été l'objet de nombreuses réflexions, les objectifs étant de spécifier les chaînes d'acquisition et de traitement AQIDOC et TRADOC, de préciser les procédures de calage à quai et d'analyser plus finement le fonctionnement des deux gravimètres KSS30 et KSS31 de manière à déceler l'origine de plusieurs dysfonctionnements. Une nouvelle interface de navigation a ainsi été étudiée et réalisée pour le KSS30 de *L'ESPERANCE* à partir d'un message de navigation fourni par la Microcin. Les causes de l'erreur importante de mesure observée en dynamique sur ce gravimètre n'ont pas été élucidées malgré une vérification complète effectuée par le constructeur début 1997. Une stabilisation trop lente de la plate-forme par un gyroscope vieillissant et le faible tonnage du bâtiment pourraient être incriminés. La qualité des mesures gravimétriques réalisées par le KSS31 du *D'ENTRECASTEAUX* n'est pas mise en cause, mais ce gravimètre a connu, surtout en fin de période, de

multiples dysfonctionnements (blocages inexpliqués par mer calme), si bien qu'il a été décidé de faire réviser par le constructeur le capteur de ce gravimètre pendant l'été 1998, alors que le KSS30 de *L'ESPERANCE* était transformé en KSS31.

4.4.2. Magnétisme

Les magnétomètres utilisés, que ce soit à bord des bâtiments ou des vedettes, sont les SMMII de Thomson qui sont faciles d'emploi et dont les capteurs sont performants. Cependant, les câbles et les connexions câble – poisson présentent une fiabilité insuffisante qui s'est traduite par de fréquentes indisponibilités du matériel.

4.4.3. Sédimentologie

Le *D'ENTRECASTEAUX* a été successivement équipé d'un sondeur de sédiments en octobre 1996 et du système RoxAnn en novembre 1997 (cf. § 1.2.2.2). Il est également capable d'effectuer des prélèvements et de mettre en œuvre un carottier Küllenberg et un sondeur latéral. Il a ainsi effectué, du mois d'août 1996 au mois de juin 1998, 16 carottages, dont 4 par grands fonds. Un des carottages par grands fonds (novembre 1996) s'est soldé par la perte du carottier suite à une rupture du câble métallique au niveau des mâchoires de la tête du carottier. A l'occasion de ses levés océaniques, *L'ESPERANCE* acquiert en continu les données de son sondeur de sédiments et l'imagerie multifaisceau. Le traitement des données sédimentologiques n'est en général pas réalisé par la mission qui se contente de transmettre les données recueillies à l'EPSHOM, ce qui a été notamment le cas pour la campagne Pré-INTIMATE (cf. § 2.1.4) à laquelle les deux bâtiments ont contribué. Par contre, à l'occasion de la campagne Rapid Response 98 (cf. § 2.3.2), la MOA a traité l'ensemble des données acquises en établissant, à l'aide du logiciel Cartosed développé par l'EPSHOM, une carte sédimentologique maillée à partir des données du sondeur latéral, du sondeur de sédiments et des prélèvements à la benne Shipeck dont la localisation avait été décidée au vu des enregistrements RoxAnn.

4.5. Instrumentation océanographique

4.5.1. Courantomètres de coque à effet Doppler

Deux courantomètres de coque à effet Doppler (ADCP) fonctionnant aux fréquences 75 et 300 kHz ont été installés sur le *D'ENTRECASTEAUX* en 1994. Ils sont composés chacun de quatre transducteurs inclinés de 30° par rapport à la verticale émettant des impulsions acoustiques vers le bas selon une cadence définie par l'utilisateur. Les bases reçoivent en retour les ondes acoustiques réfléchies par les particules en suspension se déplaçant avec les masses d'eau. Ce signal retour permet de calculer par effet Doppler le déplacement de ces particules suivant les axes des transducteurs. Ces déplacements sont ramenés dans un repère lié au bâtiment et orienté par rapport au nord à l'aide du gyrocompas. Ils peuvent être réduits du déplacement du bâtiment fourni par une interface GPS ou par le suivi du fond (bottom track) pour les faibles profondeurs. La réception du signal retour se fait dans des fenêtres temporelles définies par l'utilisateur qui permettent de calculer les vitesses des particules pour diffé-

rentes tranches d'eau qui sont appelées des cellules dont l'épaisseur peut varier de 1 à 32 m et dont le nombre peut atteindre 128. Ces courantomètres fournissent donc des profils de courant suivant un échantillonnage spatial et temporel défini par l'utilisateur.

Les données enregistrées pendant les différentes campagnes océanographiques et pendant les transits ont été mises à profit pour évaluer ces courantomètres (cf. annexe A, § 2). Les mesures apparaissent très bruitées même si des résultats prometteurs ont été obtenus lors de stations de plus de 24 heures effectuées pendant la campagne PRECOCE 98-3. Ils devraient pouvoir être largement améliorés en interfaçant les courantomètres avec une centrale inertielle pour corriger les mouvements de plate-forme, en remplaçant un transducteur qui semble défaillant, et en revoyant le montage acoustique des bases, ce qui devrait être réalisé lors du prochain passage au bassin du bâtiment. D'autre part, cette évaluation a montré la nécessité de disposer d'une chaîne de traitement permettant d'accéder aux données brutes.

4.5.2. Poisson remorqué Sea Soar

Ce système a également été installé sur le *D'ENTRECASTEAUX* en 1994 (réf. 1). Il est conçu pour remorquer des instruments de mesure à des profondeurs variant de façon contrôlée de 0 à 400 mètres. Lorsque le poisson est remorqué, son hélice entraînée par sillage fournit de l'énergie à une pompe qui génère une pression hydraulique. Cette pression est injectée vers une électrovanne commandée par un signal issu du meuble de commande et contrôlé par l'opérateur par l'intermédiaire d'un PC de pilotage. La vanne commande un piston hydraulique dont le mouvement en avant ou en arrière modifie l'angle d'inclinaison des ailes du poisson et permet le réglage de l'immersion. Le poisson du Sea Soar est un réceptacle susceptible d'embarquer différents types de capteurs, les équipements généralement embarqués étant une bathysonde Seabird mesurant la température et la conductivité de l'eau de mer et un fluorimètre mesurant la teneur en chlorophylle A.

La mise en œuvre du Sea Soar à bord du *D'ENTRECASTEAUX* avait été interrompue en avril 1996 du fait d'une commande de treuil totalement inadaptée. Celle-ci a été modifiée pendant l'IPER du début 1997. Le Sea Soar a alors pu être mis en œuvre à plusieurs reprises pendant l'année 1997, ce qui a permis de valider la nouvelle configuration du treuil ainsi que certaines évolutions des meubles de commandes. De nouvelles modifications liées essentiellement à l'installation d'une bathysonde plus performante (Seabird 911) sur le poisson, améliorant la fréquence d'échantillonnage de la mesure et supprimant le problème d'autonomie électrique de la bathysonde, ont été apportées pendant l'hiver 1997 - 1998. Les essais dans cette nouvelle configuration et le transfert de l'EPSHOM vers la MOA de la compétence sur la mise en œuvre du matériel, initialement prévus pendant la campagne ARCANE 98-2 en avril 1998, ont été retardés à cause de problèmes d'étanchéité de la liaison entre le câble électroporteur et le poisson et ont finalement eu lieu en juin 1998 à l'occasion de la campagne PRECOCE 98-3. Cette campagne a permis de parfaire la doctrine d'emploi du système (cf. annexe A, § 2) qui peut être maintenant

considéré comme opérationnel malgré le manque de fiabilité de la connexion entre le câble électroporteur et le poisson et le manque de souplesse du treuil. Près de 650 nautiques de profils Sea Soar correspondant à environ 85 heures de mesures ont été acquies à l'occasion de cinq campagnes. Plus de 60 % de ces données ont été recueillies lors de la campagne ARCANE 97-4.



Remontée du Sea Soar à bord du *D'ENTRECASTEAUX*.

4.5.3 Bathysondages

Une bathysonde Seabird 911 a été affectée à la MOA en mars 1998, ce qui a permis de limiter les transferts de matériel toujours préjudiciables à leur bon fonctionnement. Jusqu'à cette date, les mesures étaient en effet effectuées à partir d'instruments mis à la disposition du *D'ENTRECASTEAUX* à l'occasion de chaque campagne océanographique. Cette nouvelle responsabilité, ainsi que l'effort de formation consenti, ont permis au personnel de la MOA de s'impliquer totalement dans ce type de mesure, depuis l'acquisition des données jusqu'au traitement de premier niveau. D'un point de vue technique, la réalisation des stations de bathysondage a été grandement facilitée par le remplacement en février 1997, à l'occasion de l'IPER du bâtiment, du treuil Mécabolier par un treuil IMECA. Par contre, il n'a pas été possible de résoudre de manière satisfaisante les difficultés liées au câble électroporteur qui a pourtant été remplacé début 1997. Ce câble, normalement antigiratoire, s'est détorsadé et a dû ainsi être rafraîchi à plusieurs reprises. La seule mesure palliative qui a pu être trouvée a été d'effectuer des paliers pour que le câble puisse reprendre ses tours et de réduire les vitesses de descente et de remontée, avec comme conséquence une augmentation de la durée des stations. 170 stations de bathysondage ont été réalisées par le *D'ENTRECASTEAUX* à l'occasion de 8 campagnes océanographiques.

4.6. Systèmes d'acquisition et de traitement des données

4.6.1. Chaîne d'acquisition et de traitement AQIDOC - TRADOC

La MOM avait mis en œuvre la chaîne d'acquisition AQIDOC en 1995 pour quelques levés en océan Indien qui n'avaient

pas pu être traités par TRADOC compte tenu des trop nombreuses anomalies bloquantes de ce logiciel. Le rôle de la mission a ensuite consisté à effectuer des tests dans des conditions réelles d'utilisation, à signaler les anomalies détectées à l'EPSHOM et à proposer des évolutions et des spécifications logicielles (gravimétrie et magnétisme), mais la situation ne s'est améliorée que très lentement jusqu'au mois de février 1997, date à laquelle une prise de conscience générale a permis de franchir un grand pas grâce à la participation simultanée de l'équipe de projet de l'EPSHOM et des utilisateurs de la MHA et de la MOA à une validation globale (validation des algorithmes, validation du code, validation fonctionnelle informatique et validation fonctionnelle hydrographique) de la chaîne TRADOC, la MOA ayant surtout été impliquée dans la validation fonctionnelle hydrographique qui s'est faite à partir d'un levé acquis en 1995. Cette opération a abouti à la livraison en mars 1997 de la version 3.26 de TRADOC, qui bien qu'encore insuffisante, notamment en ce qui concerne la prise en compte de la célérité et de la marée, a permis au *D'ENTRECASTEAUX* de basculer dès le printemps 1997 sur cette nouvelle chaîne pour les levés bathymétriques GEBCO. La nouvelle chaîne a alors été de plus en plus utilisée ce qui a permis en mars 1998 de rédiger avec le concours de l'EPSHOM une version provisoire de sa doctrine d'emploi. La disponibilité de cette chaîne TRADOC a alors permis de reprendre la rédaction de levés réalisés en 1995 au moyen du système AQIDOC et dont la rédaction avait été différée dans l'attente d'une version opérationnelle de TRADOC. Cela a été le cas pour un levé du sud de la Réunion.

Ces problèmes de marée et les difficultés spécifiques à AQIVED ont conduit à conserver l'ancienne chaîne HYDRAC pour le levé des accès à la Vilaine du printemps 1997, l'acquisition se faisant néanmoins en double sur AQIVED. Cette double acquisition a permis par la suite de valider les modules de marée et de célérité de la version 3.27 de TRADOC livrée en octobre 1997. Au printemps 1998, le levé des accès à la Vilaine a été poursuivi sans difficulté particulière avec une seule acquisition AQIVED. Le traitement des données au moyen de la version 3.27 de TRADOC a été mis à profit pour parfaire la doctrine d'emploi de cette chaîne.

Les faiblesses de la version 3.27 de TRADOC résident dans son interface homme-machine, dans sa lenteur pour certaines opérations, et dans l'absence de module permettant de traiter la gravimétrie et le magnétisme. Ce dernier point est résolu avec la version 4.0 livrée en juillet 1998 mais qui n'a pas encore été testée à ce jour.

A bord de *L'ESPERANCE*, AQIDOC ne peut servir qu'à l'acquisition des données de gravimétrie et de magnétisme car le sondeur multifaisceau possède sa propre chaîne d'acquisition et de traitement. Il n'était donc pas opportun d'équiper ce bâtiment avec le système AQIDOC tant que TRADOC ne permettrait pas le traitement des données archivées, ce qui devrait être le cas pour la campagne de l'automne 1998. Néanmoins, *L'ESPERANCE* a été équipée dès la campagne du printemps 1998 de façon à former les personnels et à éviter le basculement pendant la période estivale. Les données acquises pendant cette campagne de printemps seront traitées dès que possible. Pour des raisons de disponibilité de matériel, le bâtiment a été équipé provisoirement d'un système hybride AQIDOC - HYDRAC.

Le matériel n'ayant pas été disponible suffisamment tôt, la *GAZELLE* n'a pas pu être équipée du système HYDRAC qui lui est destiné pour la campagne Sardaigne 98. L'acquisition des données correspondantes s'est donc faite avec l'ancienne chaîne HYDRAC. Pour les levés en embarcation, la BOM n'a travaillé jusqu'à l'été 1998 qu'avec l'ancienne chaîne, car il a été jugé plus prudent d'attendre que la nouvelle chaîne soit suffisamment qualifiée avant de la mettre en service dans une petite unité disposant de peu de moyens.

En conclusion, dès le mois de septembre 1998, les différentes composantes de la MOA, hormis la BOM, devraient utiliser exclusivement la chaîne AQIDOC - TRADOC et ainsi abandonner l'ancienne chaîne HYDRAC - HYTRAI.

4.6.2. Chaîne d'acquisition et de traitement HYDRAC - HYTRAI

Comme indiqué ci-dessus, la chaîne HYDRAC - HYTRAI a continué d'être utilisée pour certains levés mais devrait être définitivement abandonnée dès le mois de septembre 1998.

Les problèmes de cette chaîne sont essentiellement dus au vieillissement du matériel qui ne peut plus être remplacé et qui est devenu difficile à réparer. Elle a notamment été utilisée pour le levé des accès à la Vilaine réalisé au printemps 1997, pour tous les levés de la BOM, pour certains levés spécifiques du *D'ENTRECASTEAUX* qu'il aurait été hasardeux de traiter avec une chaîne non encore validée et pour l'acquisition des données géophysiques de *L'ESPERANCE*.

Les données bathymétriques des campagnes Rapid Response du *D'ENTRECASTEAUX* ont ainsi été acquises et traitées avec la chaîne HYDRAC - HYTRAI car il était primordial de pouvoir fournir dans un délai de deux jours les données numériques validées. La chaîne avait été à cette occasion complétée par l'EPSHOM pour pouvoir prendre en compte les données des récepteurs GPS Ashtech Z12 en mode cinématique temps réel.

La chaîne HYDRAC - HYTRAI a donc été utilisée pour l'acquisition et le traitement des données géophysiques de *L'ESPERANCE* jusqu'à la campagne de l'automne 1997. Il faut souligner que, compte tenu de l'affectation à la MHA de ce bâtiment jusqu'à la fin de l'année 1995, cette chaîne est différente de celle qui était utilisée à bord du *D'ENTRECASTEAUX* et qu'elle fait appel au calculateur Microvax de la MHA qui n'en ayant plus l'usage l'a cédé à la MOA en octobre 1997.

4.6.3. Chaîne de traitement du sondeur multifaisceau grands fonds de *L'ESPERANCE*

La mission a participé à la validation du logiciel ODICCE (Outil de Détection Interactif de Cycles et Cellules Erronées) développé par l'EPSHOM et dont les versions successives ont été intégrées dans la chaîne de traitement. Malgré quelques anomalies informatiques résiduelles, ce nouvel outil s'est révélé performant et améliore la qualité et la rapidité des traitements.

4.6.4. Traitement de la gravimétrie

Comme indiqué au chapitre 4.6.2, les chaînes de traitement gravimétrique de *L'ESPERANCE* et du *D'ENTRECASTEAUX* ne sont pas identiques. Cette dernière a été adaptée dans le but d'automatiser les corrections visant à supprimer les oscillations résiduelles parasites (cf. annexe A, § 2). Par la suite, l'analyse de mesures acquises dans la même zone par les deux bâtiments a montré un biais systématique de 8 à 10 mgal entre les deux séries.

4.6.5. Réseaux informatiques et liaisons numériques

Les missions métropolitaines sont reliées au réseau informatique du SHOM depuis la restructuration de leurs locaux au Centre Marine de la Villeneuve au début de l'année 1996. L'utilisation de ce réseau s'est progressivement banalisée par la multiplication des points d'accès et des périphériques répartis. Parallèlement, le parc informatique a été modernisé et homogénéisé aussi bien pour ce qui concerne les outils de traitement des données (stations TRADOC notamment) que pour la bureautique. La nécessité d'une compétence locale pour l'administration de ce réseau est vite apparue. Cette tâche a été confiée à l'ingénieur chef du service logistique de la MHA assisté, pour le soutien de la MOA, par un OMH programmeur de la mission.

Les premières étapes pour atteindre l'objectif consistant à relier les bâtiments hydro-océanographiques au réseau du SHOM ont été franchies. Un réseau spécifique a été installé sur le *D'ENTRECASTEAUX* pour les besoins de la campagne Rapid Response 97. Il était destiné à faciliter le transfert des données via un téléphone cellulaire vers le Saclantcen. La portée, limitée à 30 km des côtes, ne s'est pas révélée trop contraignante pour cette campagne à dominante côtière. Cette installation a également permis les premiers échanges de courriers électroniques et de fichiers entre le *D'ENTRECASTEAUX* et le réseau SHOM. Elle a été de nouveau utilisée pendant la campagne Rapid Response 98. Une liaison numérique par satellites Inmarsat permettant de s'affranchir du problème de portée du téléphone cellulaire a également été testée à cette occasion. Après quelques modifications visant à apporter plus de souplesse dans les protocoles de transfert (FTP) et dans la gestion du courrier électronique (logiciel outlook express), cette liaison numérique via Inmarsat a été utilisée de façon opérationnelle pendant la campagne PRECOCE 98-3 (cf. § 2.1.5). Elle s'est révélée fiable malgré quelques coupures liées au cap du bâtiment et a démontré tout son intérêt pour ce type de campagne. Les procédures email et FTP ont été utilisées et ont permis de recevoir à la mer des courriers électroniques, des sorties de modèle, des cartes de prévision, des images SAR (Synthetic Aperture Radar), des prévisions de flux thermique, etc. L'étape suivante a été l'installation pendant l'été 1998, en prévision de la campagne Antilles - Guyane, d'un serveur destiné à relier en réseau l'ensemble du parc informatique du *D'ENTRECASTEAUX* (stations AQIDOC – TRADOC, stations dédiées aux mesures océanographiques, PC). Par ailleurs, *L'ESPERANCE* a été équipée à la même époque d'un système de communication Inmarsat Mini-M comprenant un téléphone ainsi qu'un PC pourvu d'un modem permettant les liaisons par courrier électronique. Ce système doit être testé pendant la campagne de l'automne

1998 en attendant l'installation comme sur le *D'ENTRECASTEAUX* d'un réseau général.

Il convient également de signaler la connexion en juin 1998 d'un PC isolé de la BOM au réseau Internet.

Ce développement de l'informatique répartie et l'entrée en vigueur au sein de la marine d'instructions relatives à la sécurité des systèmes informatiques et notamment du guide pour la protection des systèmes d'information (GIPSI) se sont traduits concrètement pour le SHOM par une instruction d'application du GIPSI et un ordre fixant l'organisation de la sécurité des systèmes d'information. Conformément à ces textes, cette organisation a été déclinée au sein de la MOA et a abouti début 1998 à la désignation d'un assistant pour la sécurité des systèmes d'information (ASSI).

4.7. Qualité

4.7.1. Organisation qualité

L'organisation qualité de la MOA a été formalisée par la création d'un réseau qualité composé d'un animateur et de correspondants pour les différents secteurs (hydrographie, océanographie, informatique et soutien technique). Des mesures ont été prises concernant la gestion des moyens, le recueil et le traitement des données et les relations avec le reste de la Marine. Les rôles respectifs du directeur technique, de la direction du SHOM et de l'EPSHOM dans le processus de validation des levés ont été confirmés à l'occasion de la réunion des directeurs de mission du 30 janvier 1998. Une réflexion visant à décliner au niveau de l'encadrement de la mission la contractualisation des objectifs formalisée avec la direction du SHOM (cf. chapitre 3) a démarré.

4.7.2. Documentation

Dans un souci de rationalisation et d'harmonisation des méthodes, un effort a été entrepris dès la fin de l'année 1996 pour inventorier la documentation relative aux différents travaux qui peuvent être réalisés par les missions hydro-océanographiques. Ce besoin d'homogénéisation était particulièrement sensible à la MOA qui a été constituée au début de l'année 1996 en adjoignant *L'ESPERANCE* et son équipe d'hydrographes provenant de la MHA à l'ancienne MOM. Un exemple de méthodes multiples pour la réalisation d'un même travail était le rattachement gravimétrique au moyen d'un gravimètre terrestre : sans raison objective, le rattachement était effectué différemment par les équipes de *L'ESPERANCE* et celles du *D'ENTRECASTEAUX* (nombre d'allers-retours, durée et nombre d'observations sur une station). Les différents documents (instructions, guides techniques, consignes techniques, notices, etc.) ont été classés par rubriques avec un accès par mots clefs permettant des consultations et des recherches grâce au logiciel Acces. Cet inventaire a été transmis à la cellule de soutien technique et de documentation de la section géodésie – géophysique de l'EPSHOM qui a initialisé à la même époque une démarche globale de modernisation de la documentation relative aux travaux réalisés par les missions, en distinguant les normes de levés qui définissent les objectifs à atteindre pour le domaine considéré, les guides techniques qui décrivent les méthodes à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs

assignés par la norme, et les notices qui constituent des aides pour respecter les méthodologies définies dans le guide technique (matériel, logiciel, procédure, protocole, etc.).

5. ORGANISATION DES CAMPAGNES OCÉANOGRAPHIQUES

5.1. Responsabilités des différents intervenants

Les responsabilités respectives des différents intervenants d'une campagne océanographique méritent d'être éclaircies. Lors de certaines campagnes océanographiques, les personnels de la MOA ont en effet parfois eu le sentiment de ne pas être mis à contribution de façon optimale, ce qui dans certaines circonstances les ont amenés à montrer une moindre motivation pour des campagnes dont ils n'avaient pas la maîtrise de l'organisation et de la préparation. Un dialogue mieux organisé avec l'EPSHOM et un effort de formation a permis d'améliorer progressivement cette situation.

La définition des objectifs, de la stratégie de mesure et des moyens à mettre en œuvre doit rester de la responsabilité de l'EPSHOM. Les instructions techniques de la campagne doivent donc être préparées par l'EPSHOM en associant étroitement la mission, puis validées par la direction du SHOM. Pendant la phase de réalisation, et en fonction de la complexité de la campagne, un responsable scientifique extérieur à la mission pourra ou non être nommé. En effet, sa compétence pourra s'avérer nécessaire si certaines circonstances conduisent à remettre en cause ou à faire évoluer les objectifs et la stratégie. Les réorientations éventuelles de la campagne doivent alors faire l'objet d'un dialogue entre le responsable scientifique, le directeur technique de la mission et le(s) commandant(s) du (ou des) bâtiment(s), ce qui implique pour garantir l'efficacité, que chacun assume les responsabilités qui lui reviennent sans empiéter sur celles des autres.

Pour ce qui concerne les mesures proprement dites et la mise en œuvre de l'instrumentation, la solution idéale serait qu'elles soient de la seule responsabilité de la mission. Cela est facilement réalisable pour les mesures les plus basiques mais demande un investissement en formation non négligeable de la part de la mission en raison d'une instrumentation qui devient de plus en plus complexe et qui évolue rapidement. Après une formation spécifique des personnels concernés, la MOA a ainsi pris progressivement la responsabilité des mesures effectuées avec la bathysonde Seabird 911 (cf. § 4.5.3), depuis la mesure proprement dite jusqu'au traitement de premier niveau, l'interprétation et l'exploitation restant du ressort de l'EPSHOM. Les courantomètres de coque à effet Doppler (cf. § 4.5.1) ont également été mis en œuvre sous la seule responsabilité de la MOA. En ce qui concerne le Sea Soar, le transfert de responsabilité de l'EPSHOM vers la MOA n'a pas pu se faire, pour des raisons techniques, avant le mois de juin 1998 (cf. § 4.5.2). De même, un officier marinier hydrographe de la MOA a été formé à la mise en œuvre des lignes instrumentées. D'autre part, il convient de gérer avec beaucoup d'attention les compétences acquises par les personnels dans ces différents domaines, de façon à ne pas en perdre le bénéfice dans le cas de longues périodes sans l'occasion de les mettre en pratique, ce qui devrait se produire pour l'équipe du *D'EN-*

TRECASTEAUX puisque la prochaine campagne océanographique qui sera conduite à partir de ce bâtiment est programmée en septembre 1999, soit plus d'un an après la campagne PRECOCE 98-3. La solution passe par la mise en place d'un ensemble d'unités de valeur ou de mentions de compétence couvrant les différents domaines concernés et par un souci permanent de maintenir pour chaque thème un noyau suffisant de personnes compétentes.

5.2. Réservation de volumes sous-marins

Une contrainte à bien prendre en compte lors de la préparation et de la réalisation d'une campagne océanographique ou géophysique est celle de la réservation des zones nécessaires à l'exécution des travaux engageant le volume sous-marin.

D'un point de vue technique, il faut distinguer les réservations effectuées pour des travaux en station (bathysonde, carottage, etc.) et celles relatives au remorquage d'un poisson de type Sea Soar qui s'avèrent plus délicates à gérer car la zone engagée se déplace.

D'un point de vue méthodologique, il convient de planifier de façon précise et avec un préavis suffisant les différentes opérations engageant le volume sous-marin tout en sachant qu'il faudra pouvoir s'adapter rapidement à des circonstances non prévues qui peuvent être de nature variée (facteur météorologique, indisponibilité de matériels, découverte de phénomènes océanographiques comme par exemple un meddy), mais qu'il pourra alors être très difficile d'obtenir de nouvelles autorisations dans les délais souhaités.

L'exemple de la campagne PRECOCE 98-3 permet d'illustrer cette difficulté. L'objectif de cette campagne (cf. § 2.1.5) était de valider par des mesures en mer un modèle opérationnel de prévision à trois jours du comportement des couches superficielles de l'océan le long des côtes européennes qui doit, à terme, être embarqué sur les bâtiments des forces navales et leur fournir un outil de prédiction du comportement des ondes acoustiques dans l'océan. Au cours de la campagne, le modèle fut mis en œuvre à la CELENV (cellule opérationnelle d'environnement de la marine) afin de redéfinir en temps réel et en fonction des conditions d'environnement actualisées la position géographique des phénomènes à étudier. Ainsi, les coordonnées des radiales de mesures et des points stationnaires, définies lors de la préparation de la campagne, furent réactualisées régulièrement en fonction des prévisions établies par ce modèle. Cependant, la trop grande rigidité du système de réservation des zones d'exercice (Zonex) n'a pas toujours permis, faute d'autorisations, de suivre comme il aurait été souhaitable de le faire, les phénomènes physiques étudiés.

Il est ainsi paradoxal que des exercices navals perturbent la réalisation dans de bonnes conditions d'une campagne dont les résultats sont destinés à apporter un soutien aux unités chargées de la lutte sous-marine. Ce type de campagne (océanographie opérationnelle) devant se multiplier dans les années à venir, il serait souhaitable d'assouplir pour les bâtiments océanographiques militaires la procédure permettant d'obtenir les autorisations d'engager le volume sous-marin. Pour ce faire et afin de minimiser les contraintes de « parta-

ge de l'eau », il paraît nécessaire de bien analyser les impératifs de chaque communauté :

- objectif de sécurité de la navigation pour les sous-marins,
- adaptation de la programmation des travaux pour les hydrographes et océanographes,

et en l'absence de solution miracle, de soigner la communication vers les opérationnels chargés de la gestion du volume sous-marin en les informant suffisamment tôt, et régulièrement s'il y a des changements dans la stratégie de mesure, des objectifs de la campagne et de ses besoins et contraintes en termes d'occupation du volume sous-marin.

6. FORMATION

L'évolution rapide des matériels et des moyens informatiques fait qu'une formation de base enrichie d'un minimum d'expérience ne permet plus à un OMH ou à un ingénieur de maîtriser tous les aspects de sa spécialité pendant toute la durée de sa carrière. Seule une formation continue peut aider à remédier à cette situation. Grâce aux efforts importants, favorisés par un soutien efficace de l'EPSHOM, consentis dans ce domaine, la compétence technique des personnels de la mission a pu être accrue, notamment pour ce qui concerne la mise en œuvre de l'instrumentation océanographique (cf. paragraphe 5.1), ce qui a permis de renforcer l'autonomie de la mission et ses capacités à mener des campagnes océanographiques. Compte tenu de la rotation rapide des personnels et de l'espacement parfois irrégulier de ces campagnes, cet effort ne doit pas être relâché pour ne pas en perdre tous les bénéfices.

L'effort de formation a représenté de l'ordre de 6 % (chiffre de l'année 1997) de l'activité comptabilisée des OMH. Les axes importants de la formation, pour les thèmes directement liés à la conduite et à l'exploitation des travaux hydro-océanographiques confiés à la mission, ont concerné la mise en œuvre de l'instrumentation océanographique, mais aussi celle du sondeur multifaisceau de *L'ESPERANCE* et l'apprentissage de la chaîne d'acquisition et de traitement AQIDOC – TRADOC (cf. § 4.6.1). Dans ce domaine, et après une formation initiale dispensée par l'EPSHOM, les actions ont surtout été menées en interne au rythme des levés. Si le niveau atteint peut être considéré comme satisfaisant pour AQIDOC, la formation à la chaîne de traitement TRADOC ne pourra être considérée comme complète que lorsque la rédaction de plusieurs levés aura été achevée.

Dans le domaine des réseaux informatiques (cf. § 4.6.5), et sans aller jusqu'à la formation complète d'un ingénieur système, il sera utile de prévoir une formation spécifique pour l'agent de sécurité des systèmes d'information.

7. RELATIONS EXTÉRIEURES

7.1. Travaux en coopération

La MOA a été amenée à travailler en coopération avec l'OTAN et plus particulièrement avec le Royaume-Uni, le Portugal et la Tunisie.

7.1.1. Coopération avec l'OTAN

Elle s'est déroulée dans le cadre des campagnes Rapid Response décrites dans le chapitre 2.3.

7.1.2. Coopération avec les britanniques

Elle s'est déroulée dans le cadre du groupe de travail franco-britannique sur la coopération en hydrographie et en océanographie militaires (JWGHO) et a également été surtout marquée par les campagnes Rapid Response 97 et 98 pendant lesquelles le *D'ENTRECASTEAUX* et le HMS *ROEBUCK* ont été amenés à travailler en étroite collaboration. Cela s'est traduit concrètement par des réunions régulières organisées tous les deux ou trois jours alternativement sur l'un ou l'autre bâtiment de façon à répartir les zones de levé et les types de travaux en fonction des possibilités de chacun, à planifier l'activité et à s'informer de l'avancement des travaux et aussi par des échanges de personnel à la journée.

L'autre volet de cette coopération a concerné les échanges de personnels pour les opérations amphibies. Un échange d'officiers marins hydrographes a ainsi été organisé pour les levés de plageage effectués en 1997 en Corse et au Pays de Galles et a été jugé très positif par les deux parties. L'hydrographe français a apprécié de pouvoir participer à un levé dans un contexte opérationnel tandis que son homologue britannique a observé avec intérêt les techniques mises en œuvre par le SHOM.

7.1.3. Coopération avec le Portugal

Cette coopération franco-portugaise a été initialisée par un accord-cadre de coopération scientifique et technique signé le 15 mai 1996 par le SHOM et l'institut hydrographique portugais. Cet accord-cadre a été précédé par l'installation par la MOA en avril 1996 d'une station DGPS HF à Cabo Raso près de Lisbonne dans le cadre d'une convention qui est régulièrement renouvelée depuis cette date.

7.1.4. Coopération avec la Tunisie

La préparation d'un accord cadre de coopération en hydrographie et en océanographie, entre le SHOM et le service hydrographique et océanographique tunisien (SHO), a été décidée en juin 1995 lors d'une rencontre entre le directeur du SHOM et le chef d'état-major de l'armée de mer tunisienne. D'autre part, un expert hydrographe français (le maître principal DERVIN depuis l'été 1996) est présent en Tunisie pour aider le SHO à démarrer une véritable activité de service hydrographique et pour l'assister en matière de formation.

C'est dans ce contexte que le commandant en chef pour la Méditerranée (CECMED), en prévision des exercices annuels franco-tunisiens Kroumirie, a demandé la réalisation du levé des sites tunisiens de plageage concernés par l'exercice. Ces travaux ont été inscrits au programme 1997 de la MOA pour être réalisés en coopération avec le SHO. Malgré la modestie des travaux finalement réalisés (cf. § 2.8.2), cette première expérience a montré qu'il était tout à fait possible de réaliser une opération précise en collaboration. Les travaux engagés en 1997 ont ainsi été achevés en 1998 avec le concours du BSR *GAZELLE* (cf. § 2.8.2).

7.2. Escales

Les escales des bâtiments de la MOA ont été généralement choisies en privilégiant la proximité des zones de travail. Certaines d'entre elles ont également permis d'établir des contacts particuliers avec le monde de l'hydro-océanographie.

Cela a notamment été le cas pour les escales réalisées par le *D'ENTRECASTEAUX* dans le cadre des campagnes Rapid Response 97 et 98 (La Sude en Crète du 3 au 5 septembre 1997, Pylos sur la côte ouest du Péloponnèse du 13 au 15 septembre 1997 et Cadix en Espagne du 6 au 10 et du 20 au 22 février 1998) qui ont chacune été le lieu de réunions de préparation ou d'analyse de ces campagnes.

Le port de Lisbonne a été touché à deux reprises par le *D'ENTRECASTEAUX*, une première fois du 17 au 21 avril 1997 et une seconde fois du 16 au 19 juin 1998. Ces deux escales ont été l'occasion de rencontres avec nos homologues portugais qui ont organisé une visite de leur institut. La deuxième escale avait été programmée dans le cadre de l'exposition internationale « les océans, un patrimoine pour le futur ». Sur ce point, l'objectif n'a pas été complètement atteint car le bâtiment n'a pas eu accès au site de l'exposition comme cela avait été prévu.

7.3. Visites marquantes

Un certain nombre de visites, à caractère technique ou d'information, de personnalités extérieures à la Marine, ont marqué la période :

- le 2 octobre 1996, visite des locaux de l'UOA par le Capitaine de Vaisseau LAW, Directeur du Service Hydrographique d'Afrique du Sud ;

- le 11 mars 1998, visite de *L'ESPERANCE* et des locaux de l'UOA par six personnalités vietnamiennes accompagnées de l'IETA DUPUY, chef du projet Hydrovietnam à la NAVFCO ;

- le 11 août 1998, visite du *D'ENTRECASTEAUX* et des locaux de l'UOA par le Lt CDR Derek SWANNICK, officier environnement du HMS *ROEBUCK*, à l'occasion de la préparation de la campagne Rapid Response 97 ;

- le 4 juin 1998, visite du *D'ENTRECASTEAUX* et des locaux de l'UOA par le Capitaine de Vaisseau Larry WARRENFELTZ commandant le US Naval Oceanographic Office, accompagné de M. Robert BULLARD coordinateur HYCOOP à Londres et de l'ICA Gilles BESSERO de la direction du SHOM.

8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La mission océanographique de l'Atlantique emploie deux bâtiments qui ont maintenant plus de 25 ans et dont l'état général, notamment pour le BH1 *L'ESPERANCE*, commence à être préoccupant et pourrait se traduire à court terme par la perte, pour la flotte hydro-océanographique dont dispose le SHOM, de la capacité de sondage multifaisceau par grands fonds. En effet, ce bâtiment, qui est actuellement le seul équipé d'un sondeur de ce type, doit être désarmé à la

première avarie grave. La jonction avec le futur bâtiment hydro-océanographique (BHO), dont la date de mise en service reste incertaine, pourrait ainsi ne pas être assurée.

La MOA se doit d'être polyvalente puisqu'elle peut être amenée à conduire aussi bien des levés d'hydrographie générale, notamment en zone côtière avec mise en œuvre de vedettes hydrographiques, que des campagnes océanographiques ou géophysiques hauturières. Si une telle polyvalence est une richesse et un facteur d'épanouissement pour l'ensemble du personnel, son maintien constitue un challenge permanent qui passe par la création puis la conservation de noyaux de compétence dans certains domaines clés et donc par de gros efforts de formation (cf. paragraphe 6). Ces efforts risquent cependant de se trouver stérilisés si la programmation de l'activité ne permet pas une mise en pratique suffisamment régulière des techniques acquises. La périodicité des campagnes d'hydrographie générale outre-mer (a priori une campagne de 6 mois tous les trois ans), pendant lesquelles la mise en œuvre de l'instrumentation océanographique est très faible, rend indispensable un investissement actif de la mission dans le maintien des compétences, le risque étant d'autant plus important que les durées d'affectation des OMH sont relativement courtes (théoriquement trois ans, mais parfois moins). Ce maintien des compétences doit, pour être efficace, être géré au niveau de l'ensemble des populations concernées (ingénieurs hydrographes, ingénieurs logisticiens, officiers mariniers hydrographes, officiers mariniers programmeurs) du service et être relayé dans les différentes entités dont les missions.

Plus généralement, l'optimisation des ressources humaines des missions hydro-océanographiques et de l'EPSHOM consacrées aux levés hydrographiques et campagnes océanographiques, notamment dans les domaines de la préparation, de la réalisation, du soutien technique et logistique et de l'exploitation, mérite réflexion. Cette réflexion devait être engagée au dernier trimestre 1998 dans le cadre d'un petit groupe réunissant l'EPSHOM et les missions.

LISTE DES PLANCHES

Planche 1 : levé du lagon sud de Mayotte (cf. § 2)

Planche 2 : levé bathymétrique entre la Sardaigne et la Sicile (cf. § 2.2.2)

Planche 3 : levé des accès à la Vilaine (cf. § 2.4)

Planche n° 1

Levé du lagon sud de Mayotte (cf § 2)

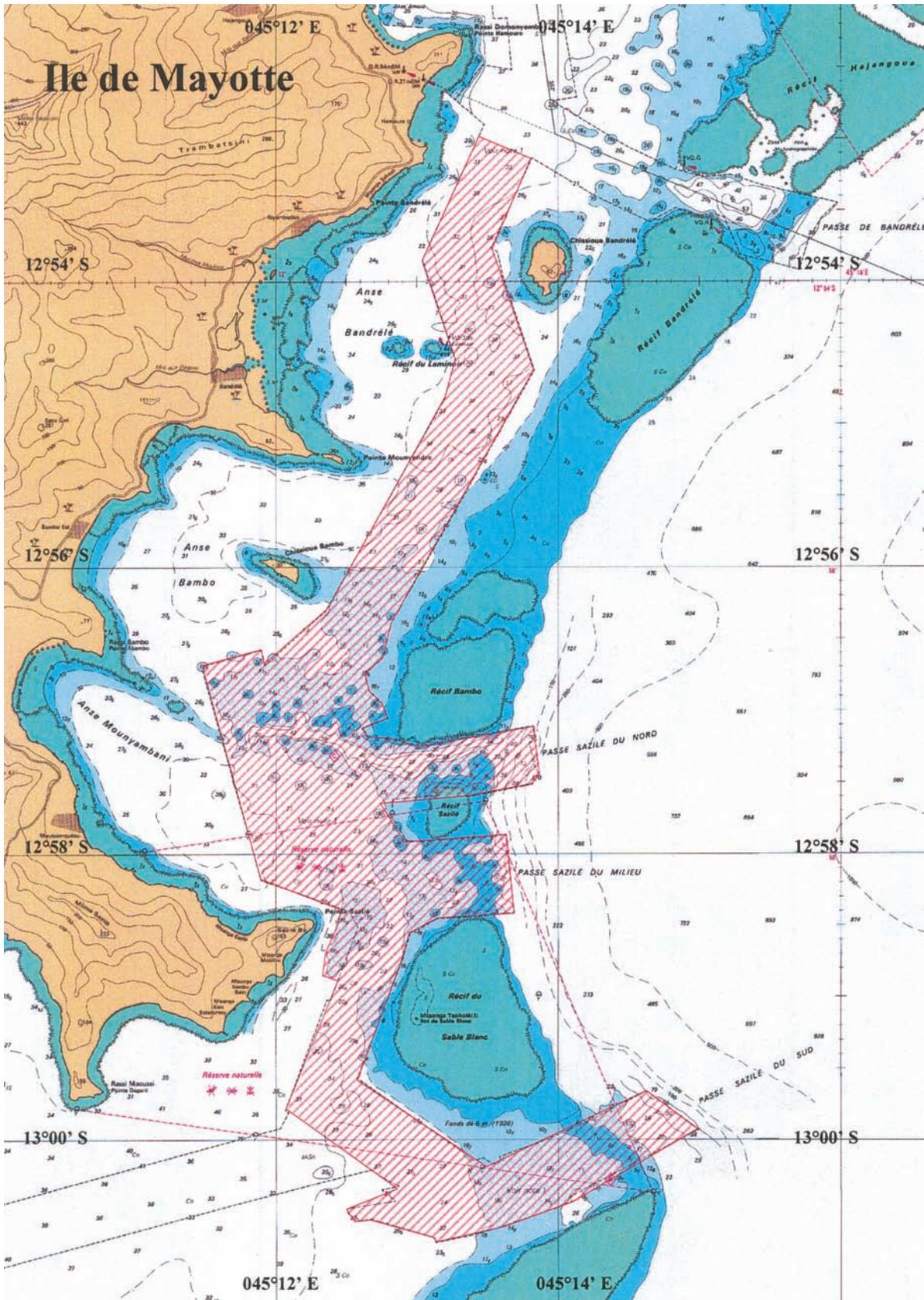
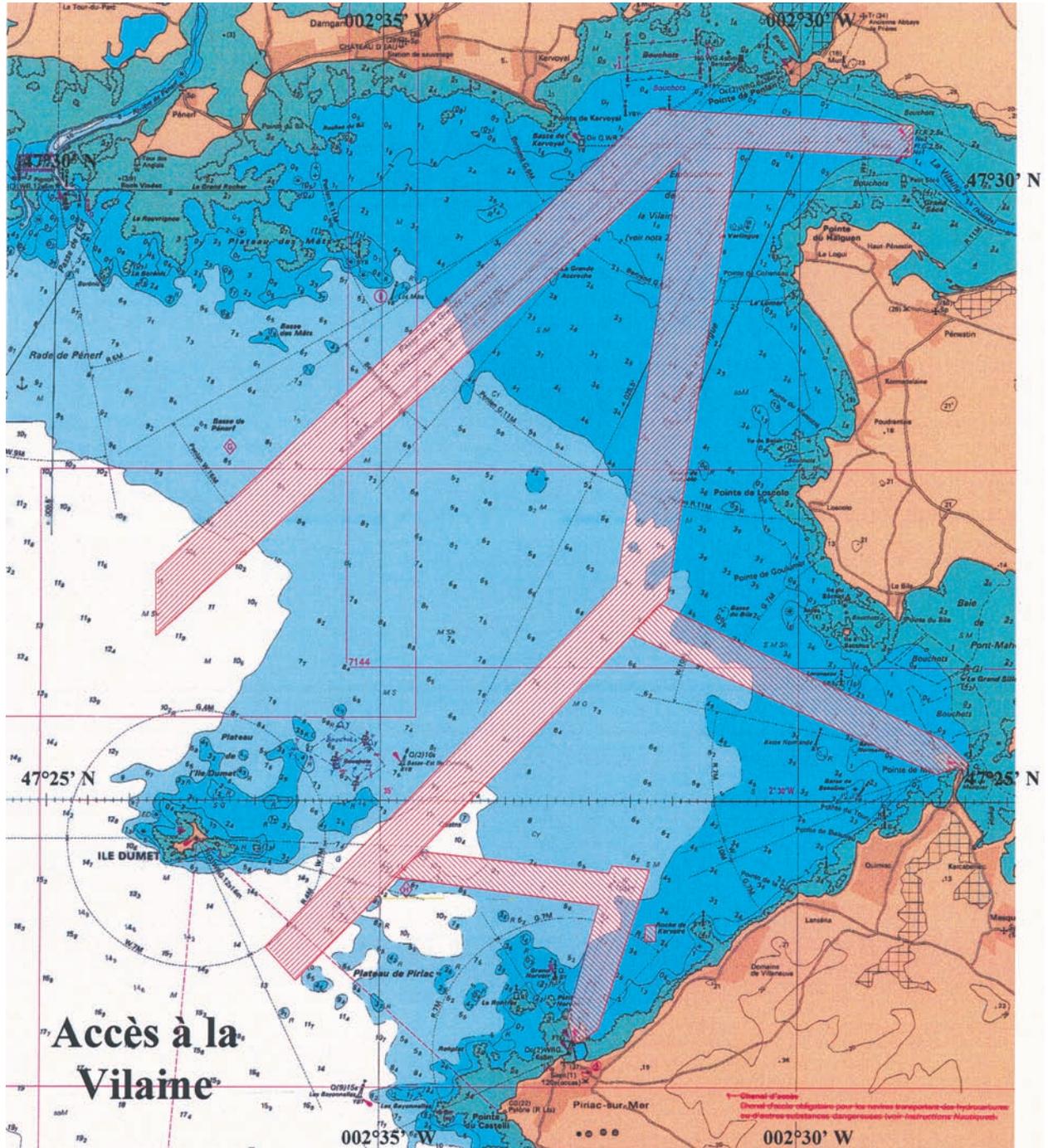


Planche n° 3

Levé des accès à la Vilaine (cf § 2.4)



ANNEXE A

Liste des rapports particuliers, comptes rendus de travaux et fiches techniques

RP = rapport particulier

CR = compte rendu

NE = note express

1. LEVÉS ET CAMPAGNES

N° CHAPITRE	OBJET	RÉFÉRENCE
2	Levé à Mayotte du chenal entre la passe Bandélé et les passes Saziley	RP 181 MOA/NP du 30.06.97
2.1.1	Campagne ARCANE 96	RP 354 MOA/NP du 05.12.96
2.1.1	Campagne ARCANE 97-2	RP 164 MOA/NP du 05.06.97
2.1.1 et 2.1.2	Campagnes ARCANE 97-4 et MODYCOT 97-1	RP 205 MOA/NP du 08.08.97
2.1.1	Campagne ARCANE 98-2	RP 160 MOA/NP du 07.05.98
2.1.3	Campagne acoustique EVA 97	RP 299 MOA/NP du 04.12.97
2.1.4	Travaux bathymétriques et sédimentologiques préliminaires à la campagne INTIMATE 98	RP 201 MOA/NP du 02.07.98
2.1.5	Campagne PRECOCE 98-3	RP 204 MOA/NP du 07.07.98
2.1.6	Campagne Brittany 97	RP 95 MOA/NP du 19.03.98
2.1.6	Campagne Brittany 98	RP 170 MOA/NP du 20.05.98
2.2.1	Campagne REGANE 96	RP 105 MOA/-- du 28.03.97
2.2.1	Campagne Açores 96-1 du <i>D'ENTRECASTEAUX</i>	RP 136 MOA/-- du 30.04.97
2.2.1	Campagnes Açores 96 de <i>L'ESPERANCE</i>	RP 180 MOA/-- du 12.05.97
2.2.1	Campagne REGANE 97	RP 134 MOA/-- du 16.04.98
2.2.1	Campagne Açores 97 de <i>L'ESPERANCE</i>	RP 10 MOA/-- du 01.05.98
2.2.1	Campagne GEOCAN de <i>L'ESPERANCE</i>	RP 11 MOA/-- du 01.05.98
2.2.3	Rédaction GEBCO 1996	CR 182 MOA/NP du 30.06.97
2.2.3	Rédaction GEBCO 1997	CR 75 MOA/NP du 09.03.98
2.2.4.a	Campagne Image 2 – Nausicaa	NE 374 MOA/NP du 15.12.96
2.2.4.a	Campagne Image 3 – Iphis	NE 239 MOA/NP du 30.09.97
2.2.4.a	Campagne Fuji	NE 318 MOA/NP du 12.12.97
2.2.4.a	Campagnes Minerve – Nivmer – Hydrocro et Kerimis	NE 143 MOA/NP du 04.05.98
2.2.4.b	Campagne ZEE Gascogne 2	NE 187 MOA/NP du 02.07.97
2.3.2.a	Campagne Rapid Response 97	RP 266 MOA/NP du 17.10.97
2.3.2.b	Campagne Rapid Response 98	RP 92 MOA/NP du 19.03.98
2.3.2.b	Campagne Rapid Response 98, expérience LASR	RP 94 MOA/-- du 19.03.98
2.5	Recherches d'épaves en Méditerranée	RP 292 MOA/-- du 28.11.97
2.6	Contrôle d'obstructions par plongeurs aux abords du quai d'honneur à Toulon	CR 50 MOA/NP du 06.02.97
2.6	Travaux de géodésie dans la région de Toulon	RP 295 MOA/NP du 04.12.97
2.6	Levé du môle d'armement à La Seyne	RP 309 MOA/NP du 10.12.97
2.6	Levé de l'apportement Milhaud 6 (port militaire de Toulon)	RP 185 MOA/NP du 05.06.98
2.6	Levé de l'apportement du Lazaret à Saint-Mandrier	RP 234 MOA/NP du 21.08.98
2.7	Levés de plageage en Méditerranée	RP 73 MOA/-- du 03.03.97
2.7	Levé de plageage de Valras	RP 91 MOA/-- du 18.03.98
2.7	Travaux de géodésie en Corse	RP 133 MOA/NP du 15.04.98
2.7	Levés de plageage en Corse	RP 139 MOA/-- du 20.04.98
2.8.1	Levé de plageage au Pays de Galles	NE 265 MOA/NP du 17.10.97
2.8.2	Levé de plageage en Tunisie	NE 240 MOA/-- du 30.09.97
4.6.1	Levé bathymétrique du sud de la Réunion	RP180 MOA/NP du 03.06.98

2. ÉVALUATIONS DE MATÉRIELS ET MÉTHODES

N° CHAPITRE	OBJET	RÉFÉRENCE
4.2	Évaluation d'une centrale de verticale DMS05	Rapport d'évaluation n° 333 MOA/NP du 18.11.96
4.2	Évaluation du système DGPS Starfix et du système VBS (Virtual Base Station) associé	Rapport n° 339 MOA/NP du 25.11.96 et Fiche n° 387 MOA/NP du 19.12.96
4.2	Présentation du système DGPS Landstar	Fiche 32 MOA/NP du 22.01.97
4.2	Évaluation du système DGPS multi-références Multifix	Rapport d'étude SHOM n° 005/98
4.2	Mesure du retard sur la sortie numérique du récepteur GPS NR103	Fiches n° 194 MOA/NP du 15.07.97 et 283 MOA/NP du 12.11.97
4.2	Évaluation de deux systèmes GPS cinématiques temps réel	Rapport d'étude SHOM n° 001/98
4.2	Utilisation du système DGPS Seastar	Fiche 52 MOA/NP du 11.03.98
4.2	Observation de la marée par GPS cinématique	Fiche 205 MOA/NP du 06.07.98
4.3	Simrad EA 300P	Fiche 175 MOA/NP du 17.06.97
4.5.1	Évaluation des courantomètres de coque à effet Doppler	Rapport 237 MOA/NP du 31.08.98
4.5.2	Doctrine d'emploi du Sea Soar	Rapport 281 MOA/NP du 22.09.98
4.6.4	Étude et mise en œuvre d'une chaîne de traitement des données gravimétriques	NE 176 MOA/NP du 18.06.97

ANNEXE B

Autres références

- 1) Michel LE GOUIC - Les nouveaux équipements océanographiques du *D'ENTRECASTEAUX* - Revue hydrographique internationale, vol. LXXIII n° 2, septembre 1996
- 2) Michel EVEN – Applications du GPS cinématique au SHOM – Revue hydrographique internationale, vol. LXXVI n° 1, mars 1999
- 3) Jean-Michel LÉCULIER – Evaluation of the multi-site differential GPS system Multifix onboard the hydrographic vessel *L'ESPERANCE* – Revue hydrographique internationale, vol. 2 n° 2, septembre 2001

Imprimerie de l'Établissement Principal
du Service Hydrographique
et Océanographique de la Marine
BP 30316 — 29603 Brest Cedex
Juin 2006

Dépôt légal deuxième trimestre 2006
Numéro d'éditeur : 2657

Sommaire

Première partie

Biographie de l'IGA Marc EYRIÈS (1919 - 2005), *par l'IGA Y. DESNOËS*

Situation de l'hydrographie en Afrique de l'Ouest, *par l'IGA M. LE GOUIC*

Références de hauteur en hydrographie, *par B. SIMON*

Modélisation côtière appliquée aux prédictions de marée pour la réduction
des sondages hydrographiques, *par L. PINEAU-GUILLOU*

Étude et modélisation de la dynamique des dunes sous-marines, *par T. GARLAN*

Deuxième partie

Mission océanographique de l'Atlantique – (septembre 1996 – septembre 1998),
par A. FOURGASSIÉ

ANNALES HYDROGRAPHIQUES 773



9 782110 938268

ISBN 2-11-093826-9