HAL
open science

Projet REBENT : Cartographie des habitats benthiques dans les petits fonds côtiers à l'aide de méthodes acoustiques

Axel Ehrhold

To cite this version:

Axel Ehrhold. Projet REBENT : Cartographie des habitats benthiques dans les petits fonds côtiers à l'aide de méthodes acoustiques. Minéralogie. Université de Caen, 2004. Français. NNT : . tel-00006680

HAL Id: tel-00006680

https://theses.hal.science/tel-00006680

Submitted on 13 Aug 2004

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

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

Direction de l'Environnement et de l'Aménagement Littoral
DEL/EC/BB – DEL/AO

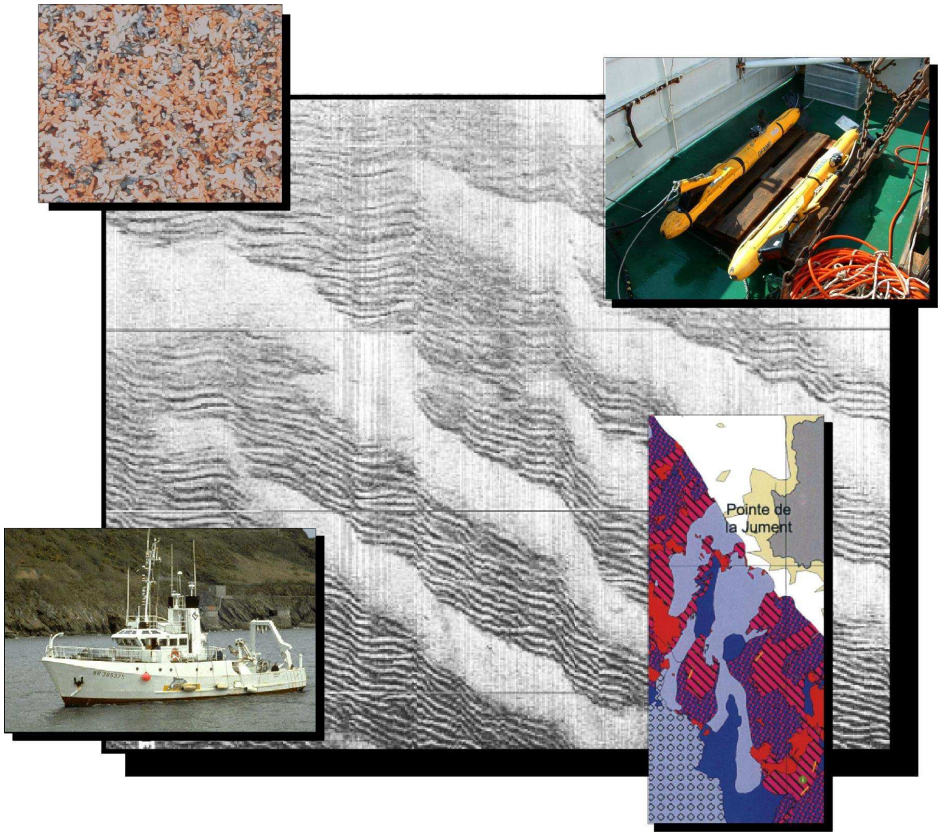
Axel Ehrhold

Avril 2004

Projet REBENT

Cartographie des habitats benthiques dans les petits fonds côtiers à l'aide de méthodes acoustiques

Synthèse des travaux réalisés dans le cadre d'un post-doctorat (Octobre 2002 – Mars 2004)



Numéro d'identification du rapport : DEL/EC/BB.RST.04.02 **Diffusion** : libre **Validé par** : Dominique Hamon, responsable du laboratoire DEL/EC/BB **Version du document** : définitive	**date de publication** Avril 2004 **nombre de pages** 55 (+ annexes) **bibliographie** (Oui) **illustration(s)** (Oui) **langue du rapport :** Français

Titre et sous-titre du rapport :

Cartographie des habitats benthiques dans les petits fonds côtiers à l'aide de méthodes acoustiques

Synthèse des travaux réalisés dans le cadre d'un post-doctorat (Octobre 2002 - Mars 2004)

Titre traduit :

Benthic sublittoral habitats mapping using acoustic systems

Auteur(s) principal(aux) : EHRHOLD Axel	**Organisme / Direction / Service, laboratoire** IFREMER/DEL/EC/BB
Collaborateur(s) : nom, prénom	Organisme / Direction / Service, laboratoire

Travaux universitaires :

diplôme :	discipline :
établissement de soutenance :	année de soutenance :

Titre du contrat de recherche :	n° de contrat IFREMER

Organisme commanditaire : nom développé, sigle, adresse

Organisme(s) réalisateur(s) : nom(s) développé(s), sigle(s), adresse(s)

Responsable scientifique :

Cadre de la recherche :

Programme :	Convention :
Projet : REBENT	Autres (préciser) :

Campagne océanographique : Rebent 1, 2003, N/O Thalia

Résumé :

Le réseau REBENT constitue un nouveau réseau de surveillance des habitats benthiques dont la vocation est d'établir un état de référence et un suivi régulier de la faune et de la flore littorales. Ce réseau entre en phase opérationnelle sur la région Bretagne. L'approche sectorielle est caractérisée par un ensemble d'études de sites (20) sur lesquels une cartographie détaillée des habitats est réalisée au 1/10 000 ou 1/25 000ème. Pour identifier en domaine subtidal les unités morpho-sédimentaires et/ou biologiques, elle s'appuie sur la combinaison de plusieurs systèmes acoustiques (sonar à balayage latéral, sondeurs mono et multifaisceaux, système RoxAnn), calibrés par des observations du fond (prélèvements, vidéo sous-marine, plongée).
Les baies de Concarneau et de Quiberon, et l'archipel de Glénan, ont été les premiers secteurs ainsi reconnus en 2003. Ces travaux montrent l'intérêt de combiner plusieurs sources acoustiques et différentes embarcations pour caractériser préalablement les habitats par petits fonds. Certaines biocénoses semblent répondre directement aux ondes acoustiques (maërl, crépidule, lanice, étoiles de mer, ophiures, maldanes) alors que d'autres, comme les fonds à Haploops, se distinguent par la morphologie du substrat sur lequel les colonies se fixent (fonds vaseux à cratères). La précision des levés (positionnement et résolution sur le fond) et la gestion sous SIG des résultats permettent de mieux comprendre la distribution spatiale de ces habitats et de suivre leur évolution.

Abstract :

The Rebent monitoring program is a new surveying network for benthic habitats. Its aim is to define a reference state and a regular monitoring system for marine coastal fauna and flora. This network recently entered an operational phase around Brittany. The sector-related approach is characterized by a set of site studies (20) on which marine habitat mapping is detailed on 1/10000 or 1/25000 map scales. Acoustic mapping technology (side scan sonar, MBES and echo sounder, RoxAnn AGDS) is used for morphosedimentary and/or biological units discrimination calibrated by ground-truthing (grab sample, submarine video and diving).
Concarneau and Quiberon bays as well as the Glénan archipelago were the first sites recognized in 2003. These results provide a global strategy and guidelines for acoustic surveys combining several acoustic sources and vessels to predefine habitats in shallow water. Some of the biocenoses seem to be directly detected by backscatter response (maërl, crepidule, lanice, starfish, ophiure, maldane) while others - like haploops colonies living on a specific mud sediment - were characterised by the heterogeneous morphology (regular and dense pockmarks) of the seabed they were fixed on. Survey precision in terms of GPS positioning and horizontal seabed resolution, added to data management features with GIS tools, ensure a better understanding and monitoring of macrobenthos species spatial distribution and evolution.

Mots-clés :

Bretagne, Concarneau, Quiberon, Glénan, REBENT, acoustique, sonar, SMF, RoxAnn, SIG, Caraibes, embarcation, sédiment, habitats marins, maërl, crépidule, fiches acoustiques.

Keywords :

Brittany, Concarneau, Quiberon, Glénan, REBENT, acoustic, side scan, MBES, RoxAnn, GIS, Caraibes, mobile survey unit, sediments, marine habitats, maërl, crepidule, acoustic cards.

Préambule

Ce travail de post-doctorat qui s'est déroulé du 1er octobre 2002 au 31 mars 2003 :

- à la Direction de l'Environnement et l'aménagement Littoral (DEL) du Centre IFREMER de Brest,
- dans le cadre du projet REseau BENThique (REBENT) animé par Brigitte Guillaumont (DEL/AO)
- au sein du laboratoire "Biodiversité Benthique", dont la responsabilité est assurée par Dominique Hamon (DEL/EC/BB),

a été riche d'enseignements, tant sur le plan technique (coordination des campagnes, mise en oeuvre d'outils et gestion des données) que sur le plan scientifique, notamment par l'approche pluridisciplinaire (sédimentologie, biologie) pour l'identification et la caractérisation des habitats benthiques littoraux.

Je tiens à remercier tous ceux de Genavir, de DEL/EC/BB, DEL/AO, DRO/GM et DNIS qui ont contribué au bon déroulement de cette étude.

Sommaire

1 – Introduction 1

2 – Stratégie générale 2

3 – Méthodologie 6

3.1 – La phase de préparation à l'acquisition des données 6

3.1.1 – La planification du levé 6
3.1.2 - Mise en œuvre des systèmes et choix des réglages 7
3.1.2.1- Le sonar à balayage latéral DF1000 EdgetechSt 7
a) Principes généraux 7
b) Configuration à bord 9
c) Remarques "matériels" 10
d) Importance du choix dans la direction des profils sonar 11
e) Recommandations 11
3.1.2.2 - L'option sonar à balayage latéral du Reson Seabat 8101 13
a) Configuration à bord 13
b) Recommandations 13
3.1.2.3 – Le système RoxAnn 14
a) Principes généraux 14
b) Configuration à bord 14
c) Recommandations 15
3.1.2.4 – Les sondeurs multifaisceaux petits fonds : exemple de l'EM1000 de la société Simrad et du Seabat 8101 de la société Reson 16
a) Principes généraux 16
b) Recommandations 17
3.1.3 – La gestion et la vérification des données à bord 17

3.2 – Le traitement des données 18

3.2.1 - Les prélèvements sédimentaires 18
3.2.2 – Les systèmes acoustiques 19
3.2.2.1- Le sonar à balayage latéral DF1000 EdgetechSt 19
a) Traitement de la navigation 19
b) Mosaïquage (Caraibes 2.5) et vectorisation (Arcview) 20
c) La calibration des faciès acoustiques : exemple de la baie de Concarneau 21
3.2.2.2 - L'option sonar à balayage latéral du Reson Seabat 8101 24
3.2.2.3 – Le système RoxAnn 27
3.2.2.4 – Les sondeurs multifaisceaux petits fonds 29
3.2.3 – Exemple de données produites sur la baie de Concarneau 31

4 – Discussion 32

4.1 – Le DF1000 : Pièce maîtresse dans la stratégie Rebent 32

4.1.1 – Ambiguïté des réponses acoustiques 32
4.1.2 – Détection des biocénoses par méthodes géophysiques 33
4.1.2.1 – Les espèces "stars" en acoustique : 33
a) Les biocénoses de maërl 34

b) Les biocénoses à crépidules 35
4.1.2.2 – Les signatures à conforter 36
a) Interférences par une couverture algale dense ? 36
b) Faciès acoustique tacheté à *Maldane glebifex* ? 37
c) Faciès acoustique "boursouflé" à *Lanice conchilega* ? 39
d) Faciès acoustique tacheté à *Asterias rubens* ou *Amphiura filiformis* ? 40
e) Faciès acoustique tacheté à *Ophiocomina nigra* ? 42

4.2 – Le système RoxAnn : sa place dans la stratégie Rebent ? 43

5 – Conclusions 48

Annexes

(1) Types de classification adoptée
(2) Exemple de fiche granulométrique
(3) Tableaux résultats des analyses granulométriques
(4) Mosaïque globale DF1000 du Secteur Concarneau
(5) Extraits de mosaïque sonar Reson Seabat 8101
(6) Fiches acoustiques DF1000
(7) Carte des faciès acoustiques DF1000 et Reson Seabat 8101 sur Concarneau
(8) Carte des faciès acoustiques DF1000 sur Glénan
(9) Carte des faciès acoustiques DF1000 sur Quiberon
(10) Carte morphosédimentaire sur Concarneau
(11) Carte morphosédimentaire sur Glénan
(12) Carte morphosédimentaire sur Quiberon
(13) Cartes d'interpolation des données de rugosité (E1) et de dureté (E2) de RoxAnn
(14) Rapport de fin de campagnes 2003 (missions acoustique et biologique)
(15) Fiche Outil n°1 : Les systèmes de classification automatique de la nature des fonds
(16) Fiche Outil n°2 : Le sonar à balayage latéral
(17) Fiche Outil n°3 : Le sondeur multifaisceaux

1- Introduction

Les évènements catastrophiques récents (tempêtes et naufrages), les besoins croissants de gestion intégrée des milieux littoraux (Contrats de baie, DCE, directive Habitats…) et de leur préservation (zones Natura 2000, ZNIEFF, parcs marins…), constituent les raisons majeures de développer un réseau national d'observation des biocénoses marines côtières (Guillaumont et *al.*, 2001). Le réseau d'observation REBENT (Réseau Benthique) doit permettre de faire l'inventaire des espèces et des biocénoses à forte valeur économique et/ou patrimoniale et d'assurer leur surveillance à long terme. Initié sur le pilote breton, il a pour vocation d'assurer par la suite, une connaissance minimale homogène du domaine benthique littoral français et son suivi.
Dans la stratégie générale du REBENT, l'approche sectorielle constitue un niveau intermédiaire entre l'approche zonale générale et l'approche stationnelle (Guillaumont et *al.*, 2001 et 2002). Elle peut être assimilée à un ensemble d'études de secteurs pour :

- servir de référentiel permettant de mettre en évidence des évolutions spatio-temporelles des habitats et des peuplements,
- préciser le contexte du référentiel stationnel,
- disposer de données de référence afin d'établir des modèles prédictifs de la distribution des principaux peuplements, entre les portions du littoral insuffisamment informées.

Il est envisagé de procéder sur chacun des secteurs subtidaux à une cartographie au 1/10000ème ou 1/25000ème des principaux habitats et de leurs peuplements, depuis le large (environ 30 m de profondeur) jusqu'au sommet de l'estran. Les paramètres abiotiques, que sont principalement la nature du substrat (granulométrie) et la bathymétrie (morphodynamique), sont associés aux données biologiques. Pour atteindre cet objectif, tout en minimisant l'échantillonnage sédimentaire et biologique, dont les analyses en laboratoire sont longues, la reconnaissance des fonds marins va s'appuyer principalement sur des méthodes d'observations indirectes (systèmes acoustiques, orthophotographie littorale). La mise en œuvre des systèmes acoustiques sur différents navires, doit donc permettre une économie de moyens sans compromettre la qualité des résultats.

Le volet sectoriel subtidal du REBENT est entré en phase opérationnelle en 2003 sur 3 des 20 secteurs de référence du littoral breton, morphologiquement et sédimentologiquement différents (baies de Concarneau et de Quiberon, archipel de Glénan). **Ce rapport est un bilan des activités conduites dans le cadre d'un post-doctorat de 18 mois sur la cartographie des habitats dans les petits fonds à l'aide de méthodes acoustiques**.
Les travaux réalisés ont consisté à assurer le démarrage opérationnel du réseau, tout en testant les outils et les traitements appropriés afin d'optimiser l'approche sectorielle subtidale et d'en définir un cadre d'utilisation transposable sur les autres façades littorales. Ce rapport rassemble donc un certain nombre de détails techniques et de recommandations. Il s'appuie volontairement sur de nombreuses annexes qui présentent le déroulement complet des campagnes géophysiques qui se sont déroulées en 2003 (32 jours d'acquisition à la mer), les caractéristiques détaillées des outils acoustiques (fiches outils) transmises à la DIREN Bretagne en décembre 2003 dans le cadre de l'Avant Projet Détaillé (APD), les fiches de synthèse acoustique et les cartes finalisées.

Le document s'articule de la manière suivante :

- La stratégie générale met en place le cadre de l'approche sectorielle, avec la combinaison des moyens embarqués et des navires opérationnels ;
- La méthodologie décrit chacune des étapes : la phase de planification du levé, la mise en oeuvre des systèmes à bord, les traitements et les données produites ;
- Enfin, la discussion constitue un ensemble de réflexions sur l'interprétation de l'imagerie acoustique, sur les perspectives en terme de reconnaissance directe de certaines biocénoses et sur l'intérêt d'un système comme RoxAnn.

2 – Stratégie générale

La stratégie consistant à aborder la cartographie des habitats avec les méthodes acoustiques est complexe, compte tenu de leur mise en œuvre en domaine côtier (engins remorqués) et des moyens humains et matériels à engager (techniciens et ingénieurs spécialisés). Chacun des systèmes, pris séparément, n'a pas la prétention de fournir l'ensemble des informations requises pour obtenir une cartographie pertinente des habitats. Seule la combinaison de ces moyens permet d'accéder à un niveau de confiance suffisant pour définir, au final, les délimitations des peuplements benthiques. Les combinaisons des systèmes sont donc multiples mais demandent, dans chacune des options choisies, le couplage d'un système acoustique à un système d'observation directe du fond. Sur ce principe fondamental, le choix et la combinaison des techniques dépendront :

(1) de la taille et de la complexité de la zone à explorer (gamme de profondeur, relief),
(2) de l'échelle de détectabilité des biocénoses recherchées (précision décimétrique, métrique, décamétrique),
(3) du temps mission disponible,
(4) et des moyens financiers consacrés au projet.

Le choix des moyens acoustiques et du type d'embarcation sont conditionnés par la morphologie du fond et la bathymétrie, notamment dans la bande littorale. En fonction de ces facteurs, plusieurs solutions sont alors envisageables. Dans la configuration des secteurs REBENT, les profondeurs s'échelonnent généralement de 0 à 30 m, avec pour le pilote breton, une bathymétrie littorale rendue complexe par la présence de nombreux haut-fonds et d'îles. La meilleure solution consiste donc à explorer la tranche 0-10 m par une embarcation légère spécialisée équipée de systèmes acoustiques adaptés. L'exploration de la tranche inférieure 10-30 m peut être laissée à un navire côtier océanographique, mieux armé pour affronter les conditions de mer ouverte.
La stratégie de surveillance des biocénoses benthiques fait donc appel à une combinaison de moyens dont le dénominateur commum s'articule autour des SIG (Systèmes d'Informations Géographiques). Pour réaliser une couverture complète des habitats de chacun des secteurs avec une résolution homogène transversalement, tout en prenant en compte la topographie complexe du littoral, il est nécessaire de combiner différents moyens d'acquisition (fig. 1). Ainsi plusieurs capteurs acoustiques sous-marins sont mis simultanément en œuvre sur deux types d'embarcations : un navire de la flotte côtière d'IFREMER (N/O Thalia), au-delà de l'isobathe 10 m, et une vedette légère à très faible tirant d'eau permettant de "slalomer" entre les hauts-fonds et les îles entre -10 et -2 m. Pour la bande côtière comprise entre le zéro des plus basses mers et l'isobathe 5 m, l'exploitation des orthophotos littorales permet d'assurer la continuité cartographique avec l'approche sectorielle intertidale. La précision des "objets" sous-marins (platiers rocheux, banc de maërl, dunes sous-marines…) ainsi reconnus est de l'ordre de quelques décimètres de résolution à la surface du fond.
La caractérisation des habitats marins subtidaux s'orchestre selon un schéma qui s'appuie sur la complémentarité de deux missions océanographiques espacées de l'ordre d'un semestre de manière à analyser la première pour planifier la seconde. Pour le suivi et la surveillance des habitats dans leur ensemble, un même secteur sera reconnu tous les 6 ans selon un protocole qui sera allégé en fonction du résultat des campagnes précédentes (fig. 2). Les principales méthodes d'études permettant d'identifier les formations superficielles et de caractériser les peuplements benthiques subtidaux dans le cadre du réseau Rebent sont régulièrement mises en œuvre dans les projets internationaux de cartographie des habitats (Robinson et *al.*, 1996 ; Starr et *al.*, 1997 ; Foster-Smith et *al.*, 1999 ; Kenny et *al.,* 2000 ; Davies et *al.,* 2001 ; Cochrane et Lafferty, 2002). Les moyens de détection acoustique sous-marine restituent en premier lieu les propriétés acoustiques du substrat et fournissent un préalable à la cartographie des habitats. Certaines techniques permettent d'accéder à une connaissance exhaustive de la bathymétrie et de la réflectivité du fond ; c'est le cas pour les Sondeurs MultiFaisceaux (SMF) et les Sonars à Balayage Latéral (SBL), d'autres n'enregistrent les caractéristiques du fond que partiellement, à

la verticale des capteurs, comme c'est le cas avec les Systèmes Acoustiques de Classification Automatique des Fonds (SACLAF).

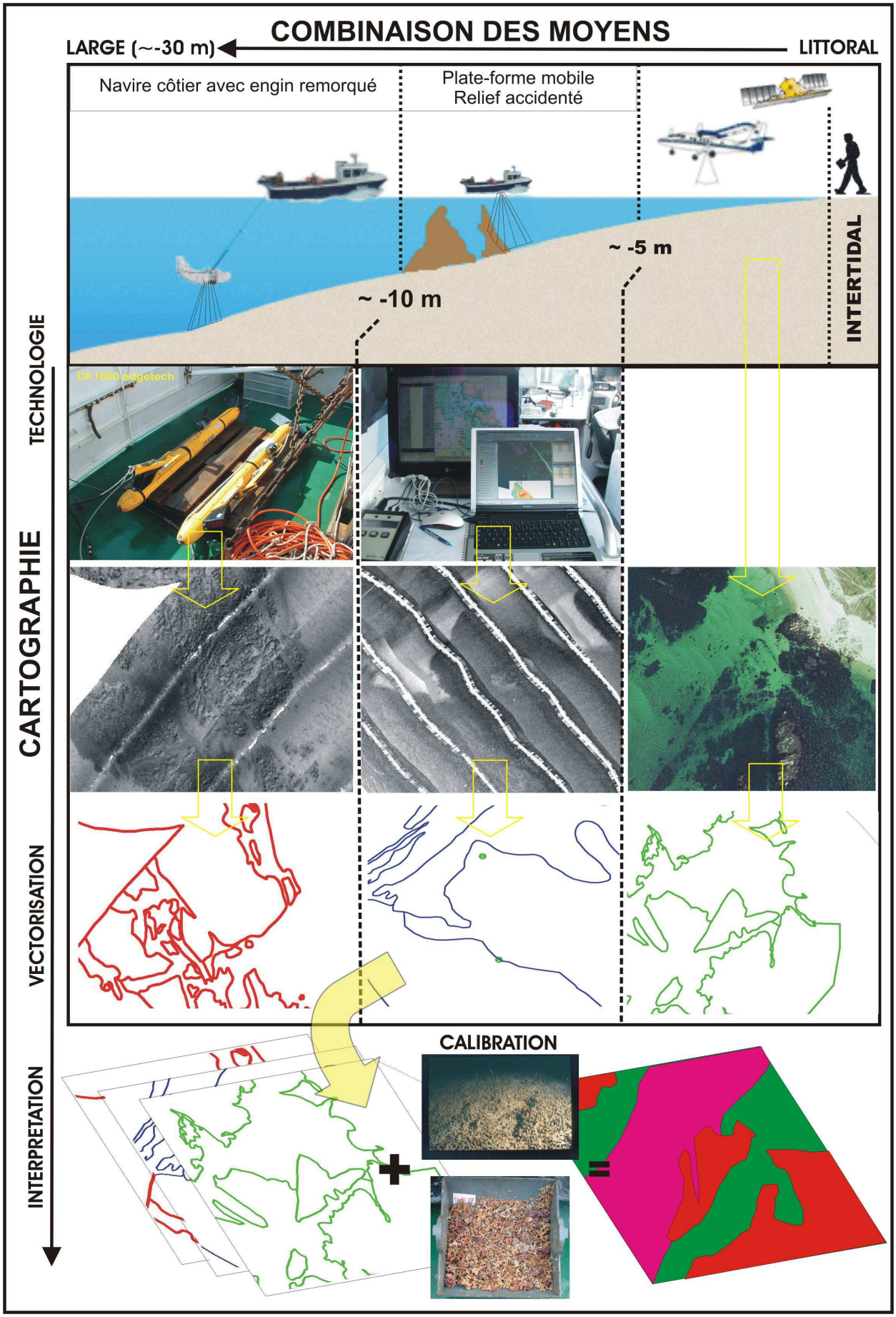


Figure 1 : Combinaison des outils en domaine subtidal et intégration sous SIG des données

La précision théorique sur le fond varie en fonction des émetteurs : de quelques décimètres (SBL), à 1 m (SMF), voire plusieurs mètres (SACLAF).

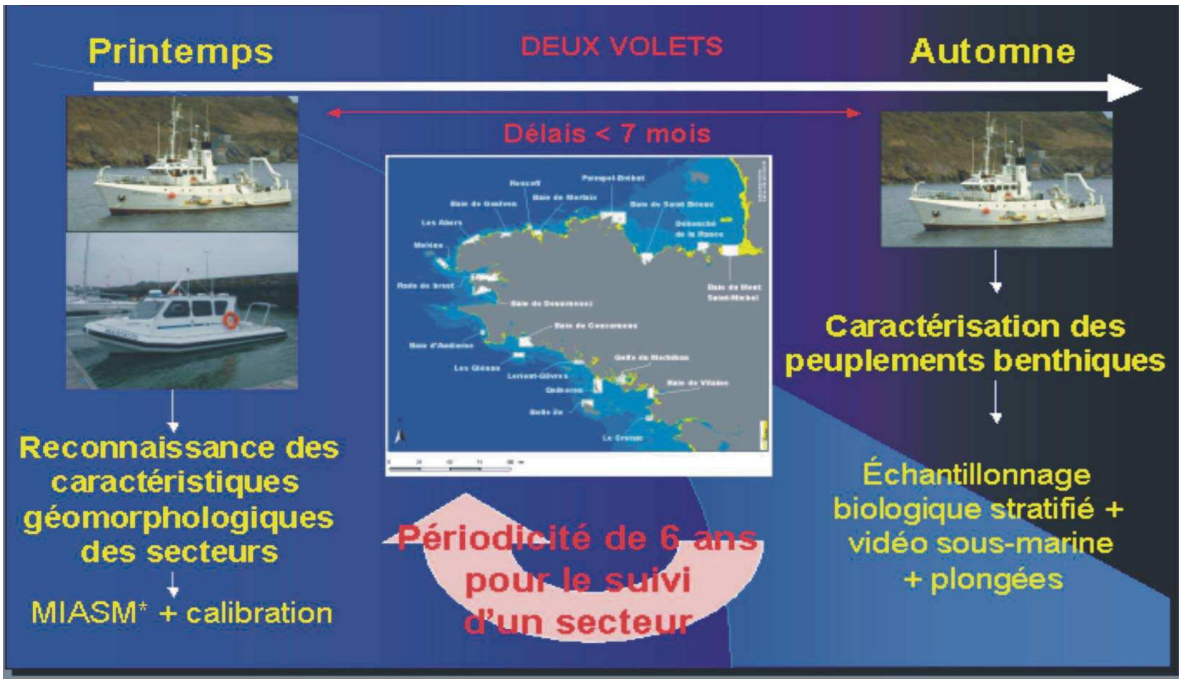


Figure 2 : Stratégie de mise en œuvre des moyens à la mer dans le cadre des levés en domaine subtidal

(* MIASM : Moyens d'Imagerie Acoustique Sous-Marine)

Le substrat sédimentaire ou rocheux, tout comme la profondeur sont des facteurs qui influencent directement la distribution spatiale des espèces macrobenthiques (Dauvin, 1997). L'imagerie sous-marine restitue en premier lieu les propriétés physiques du substrat (granulométrie, rugosité, dureté, structuration, …) qu'il faut calibrer et interpréter à l'aide des observations de terrain (prélèvements à l'aide de bennes, observations par vidéo sous-marine ou par plongeur). Les systèmes acoustiques hautes fréquences de type sonar à balayage latéral sont employés depuis plusieurs années pour prospecter rapidement de larges zones côtières avec une très bonne résolution. Ils permettent d'identifier la nature des formations superficielles, de caractériser le modelé et la dynamique du fond et parfois de cartographier directement certaines biocénoses en forte densité :

- herbiers de posidonies (Paillard et *al*., 1993 ; Siljestroem et *al*., 1996 ; Pasqualini et *al*., 1998 ; Belsher et Houlgate, 2000 ; Piazzi et *al*., 2000),
- biocénoses de maërl (Augris et *al*., 1993 ; Hamon *in* Augris et Hamon, 1996),
- biocénoses à crépidules (Hamon *in* Augris et Hamon, 1996 ; Ehrhold et *al*., 1998, Sauriau et *al*., 1998),
- oursins plats *Dendraster excentricus* (Fenstermacher et al., 2000),
- *Lanice conchilega* (Augris et *al*., 1993 ; Degraer et *al*., 2002),
- Récifs de coraux (Roberts et *al*., 1987 ; Marshall et Davies, 1988 ; Hovland et *al*., 2002),
- Coquille Saint-Jacques (Kostylev et *al*., 2002),
- huîtres (Smith et *al*., 2001).

Il y a souvent une différence entre le temps nécessaire pour couvrir une zone et la résolution nécessaire pour cartographier les habitats (tab. 1).

	SMF EM1000 (12 nœuds)			SBL MS992 Simrad (4 nœuds)		
Profondeur (m)	Portée (m)	Empreinte max. (m)	Surface couverte (km^2/jour)	Portée (m)	Empreinte max. (m)	Surface couverte (km^2/jour)
10	70	2,4	40	400	1	67
50	350	12	195	400	1	67
100	700	24	390	400	1	67

Tableau 1 : Résolution et surface couverte pour un SMF et un SBL
(d'après Kenny et *al.,* 2000).

Ce tableau montre que, par petits fonds, le SBL est très supérieur en terme de surface couverte par jour et de résolution. Mais plus la profondeur augmente et plus un système comme les SMF devient potentiellement intéressant dans l'objectif d'optimisation des moyens. Cependant, le poisson sonar étant remorqué à une hauteur constante au-dessus du fond, son utilisation devient délicate par très petit fond (<10 m) dans les secteurs côtiers où la situation de remorquage peut être dangereuse pour la sécurité du bateau et de son équipage, alors que les transducteurs d'un SMF montés sous la coque seront moins exposés. Pour les zones Rebent, la combinaison d'un SMF et d'un SBL fournit une bathymétrie précise (quelques décimètres) et une imagerie de haute résolution (pas horizontal de 10 cm). Pour pallier ces difficultés, une petite embarcation équipée de systèmes acoustiques de coque (figure 3a en Annexe 14) prend le relais pour la frange littorale.

(1) Une première phase de reconnaissance détaillée, au printemps, de la morphologie et de la nature du substrat par des méthodes géophysiques.

Il s'agissait de caractériser du point de vue morphosédimentaire les 3 secteurs en question et de définir la localisation précise de certaines biocénoses infra-littorales des substrats meubles (sables fins et maërl) devant faire l'objet d'un suivi stationnel annuel. Ces premières missions acoustiques ont permis de tester différents systèmes et configurations d'acquisition des données acoustiques dans la perspective d'un rendu optimal en fonction de la résolution recherchée, du temps bateau disponible et de la surface de chacun des secteurs.

A bord du N/O Thalia (figure 2a en Annexe 14), Genavir a mis en œuvre :

a) le sonar à balayage latéral (SBL) bi-fréquences DF1000 EdgetechSt (figure 2c en Annexe 14). Il s'agit d'un poisson remorqué qui balaye latéralement et simultanément une large bande sur le fond marin (fauchée) selon deux fréquences (100 et 400 kHz).
b) le sondeur multifaisceaux (SMF) EM1000 SimradSt (figure 2d en Annexe 14) qui balaye également le fond selon une fauchée égale à 7 fois la profondeur environ. Il produit un MNT bathymétrique très précis.
c) le système RoxAnn mono-fréquence (figure 2e en Annexe 14), loué à la société écossaise Stenmar SonaVision Ltd. C'est est un système de classification automatique de la nature des fonds, connecté au sondeur vertical du bord (200 kHz).

Pour calibrer les faciès acoustiques, des observations directes du fond ont été obtenues par prélèvements à partir d'une petite benne maniable de type Shipeck (figure 2f en Annexe 14) et dans une moindre mesure, à partir de séquences de vidéo sous-marine sur un bâti remorqué (figure 2g en Annexe 14).

A bord de la vedette Survex de la société Mesuris (figure 3a en Annexe 14), les systèmes étaient au nombre de deux :

a) le sondeur multifaisceaux (SMF) ResonSt Seabat 8101 (240 kHz),
b) l'option sonar à balayage latéral de coque sur la même fréquence que celle du sondeur.

(2) Une caractérisation biologique, à l'automne, pour chacune des principales unités morphosédimentaires préalablement définies.

Pour cela, divers outils et techniques complémentaires ont été mis en œuvres :

a) la benne Hamon (fig. 11a en Annexe 14), pour échantillonner quantitativement la macrofaune des fonds meubles (taille supérieure à 2 mm) ; un godet d'1/8 m² a été préféré au godet d'1/4 m², équipant habituellement cette benne, de manière à augmenter le nombre de prélèvements (3 prélèvements biologiques + 1 prélèvement sédimentaire par station) afin d'avoir une meilleure estimation statistique de la richesse et de la diversité faunistique, tout en restant dans un volume raisonnable d'échantillons à analyser ;
b) une drague à bivalves pour récolter les espèces de la mégafaune (au moins qualitativement, sinon quantitativement) ;
c) la vidéo sous-marine, équipant un bâti ponctuel (fig. 2h en Annexe 14) pour une utilisation en dérive au-dessus de fonds accidentés (rocheux ou parsemés de blocs) ou une troïka (fig. 11e en Annexe 14) pour la prospection de fonds meubles dépourvus d'obstacles ; la reconnaissance des fonds par imagerie vidéo offre le double avantage de compléter la description morphosédimentaire et d'acquérir des données sur la distribution des macro-espèces animales et végétales, mobiles ou fixées.

Grâce à la reconnaissance préalable des fonds par méthodes acoustiques et à une première exploitation des données acquises (Rebent 1, mars 2003), l'échantillonnage biologique a pu être optimisé (échantillonnage stratifié) et surtout limité quantitativement, sans nuire à la qualité des résultats attendus. Au contraire, la complémentarité des approches morphosédimentaire et biologique, la première s'appuyant sur les résultats de la seconde, permet au final de produire une carte de synthèse des entités bio-morphosédimentaires, aux limites clairement identifiées et aux caractéristiques biologiques et sédimentaires précisément définies. Il convient de préciser que les petits fonds, explorés préalablement à l'aide du Survex, n'ont pu être caractérisés, les contraintes du N/O Thalia ne permettant pas d'y accéder.
Pour compléter l'approche sectorielle, au vu des manques constatés à la suite de Rebent 1 pour calibrer l'imagerie acoustique, des prélèvements complémentaires de sédiments superficiels ont été effectués à la benne Shipeck sur chacun des trois secteurs. Des plongées ont en outre permis, sur le secteur de Concarneau, de compléter les observations en quelques points particuliers, notamment au niveau des zones à cratères (fig. 11f, g et h en Annexe 14).

3 - Méthodologie

3.1 – La phase de préparation à l'acquisition des données

3.1.1 – La planification du levé

La préparation du levé est réalisée sous système d'information géographique (Arcview, Mapinfo…) afin d'intégrer un certain nombre de paramètres physiques et biologiques connus sur la zone à explorer et susceptibles de participer aux bons choix au moment de la planification (informations sur les cartes marines, annuaire des marées et travaux scientifiques). Les cartes morphosédimentaires les plus récentes, une fois géoréférencées, complèteront la connaissance de la répartition des sédiments et de la bathymétrie générale du secteur avant d'embarquer. Ces informations, notamment la bathymétrie, conditionnent avec le trait de côte, la direction générale des profils acoustiques et les réglages qu'il faudra adopter au moment du levé (portée du SBL, fréquence d'acquisition du SACLAF, distance entre les profils, sites de pré-calibration, sites de contrôle, *cf.* paragraphe suivant). Le deuxième avantage de la gestion de la campagne sous SIG, réside dans les fonctionnalités d'un tel outil pour dresser rapidement un plan de situation des profils acoustiques, parallèles les uns aux autres, avec la possibilité de calculer les coordonnées géographiques de début et de fin de chaque profil et la longueur de chaque segment (fig. 3). Le plan de levé est alors exporté vers le système Olex de navigation du bord géré par

Genavir (fig. 5a en Annexe 14), afin que la passerelle dispose et visualise les mêmes informations que le responsable scientifique de la mission.

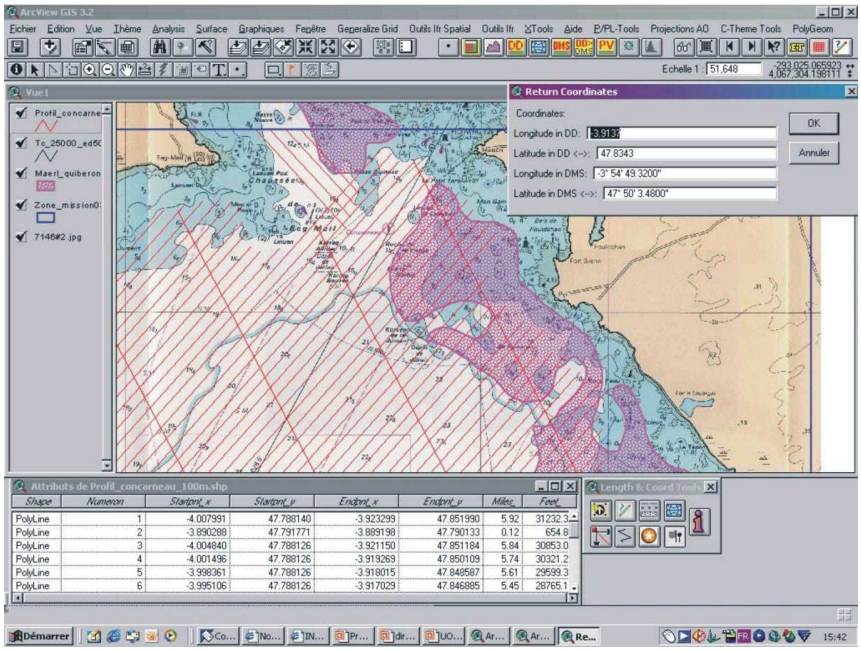


Figure 3 : Exemple d'un plan de mission acoustique réalisé sous Arcview 3.2 en baie de Concarneau

3.1.2 - Mise en œuvre des systèmes et choix des réglages

Le fonctionnement détaillé de ces systèmes est présenté dans les fiches outils associées à chacun des systèmes en annexes (Annexes 14, 15 et 16). Le déroulement des campagnes Rebent 1 Thalia et vedette (planning, nombre de profils effectués, matériel embarqué…) est consigné dans le rapport de fin de campagnes (Annexe 14). La figure 4 résume l'ensemble des moyens acoustiques engagés lors de la première campagne Rebent en mars 2003.

3.1.2.1- Le sonar à balayage latéral DF1000 EdgetechSt (Annexe 16)

a) Principes généraux

Ce système, composé d'un poisson tracté derrière l'embarcation à une altitude constante au-dessus du fond (entre 10 et 15 m), est mis en œuvre pour des fonds supérieurs à 10 m (fig. 5a). La prospection acoustique des fonds littoraux (inférieurs à 10 m) à partir des navires côtiers se prête mal à son utilisation, non seulement pour des raisons de sécurité, mais aussi en raison d'une dégradation des données restituées. La vitesse du bateau varie entre 4 et 6 nœuds, en fonction de la portée choisie, de l'état de la mer et de la profondeur. Elle permet d'insonifier, en fonction des réglages adoptés (vitesse, portée latérale, largeur de chevauchement), une superficie de 1 à 8 km^2/heure.

Le sonar latéral balaye le fond à une fréquence généralement comprise entre 100 kHz et plusieurs centaines de kHz. Il fournit en continu, et sur plusieurs dizaines à centaines de mètres de largeur, une image en niveau de gris de très haute résolution de la rétrodiffusion du fond. Sur ces images acoustiques (sonogrammes), les types de fonds tels que les zones de roches ou des biocénoses spécifiques (maërl, moulières, crépidules, lanices, herbiers…) peuvent être directement différenciés et délimités avec précision (fig. 5b). En effet, en fonction de la densité des individus sur le fond, les propriétés physiques, et donc acoustiques du substrat sont modifiées et ces biocénoses peuvent être détectées par le sonar. Son principe repose donc sur une signature acoustique propre à chaque type de substrat (morphologie et composition granulométrique du fond).

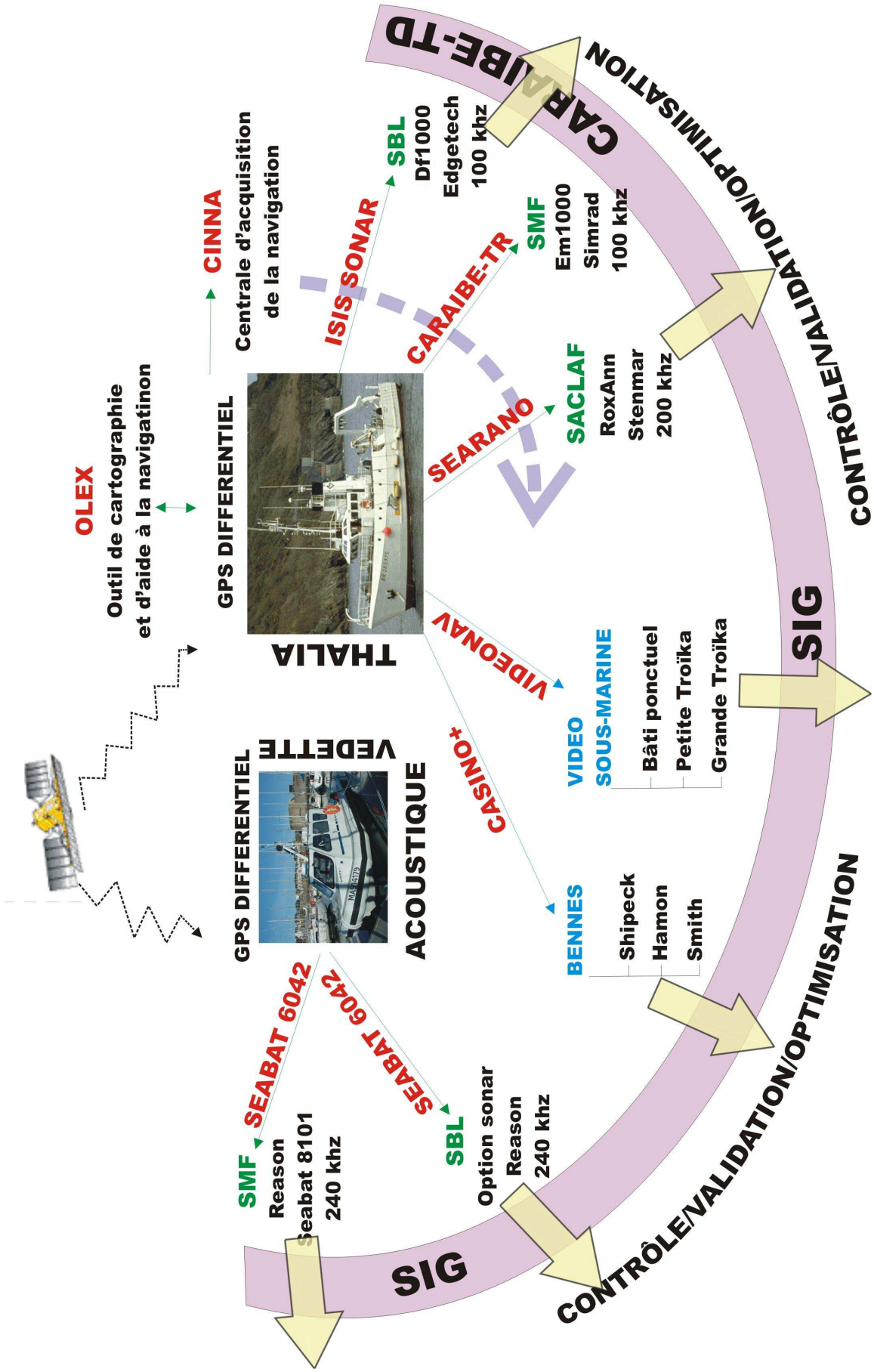
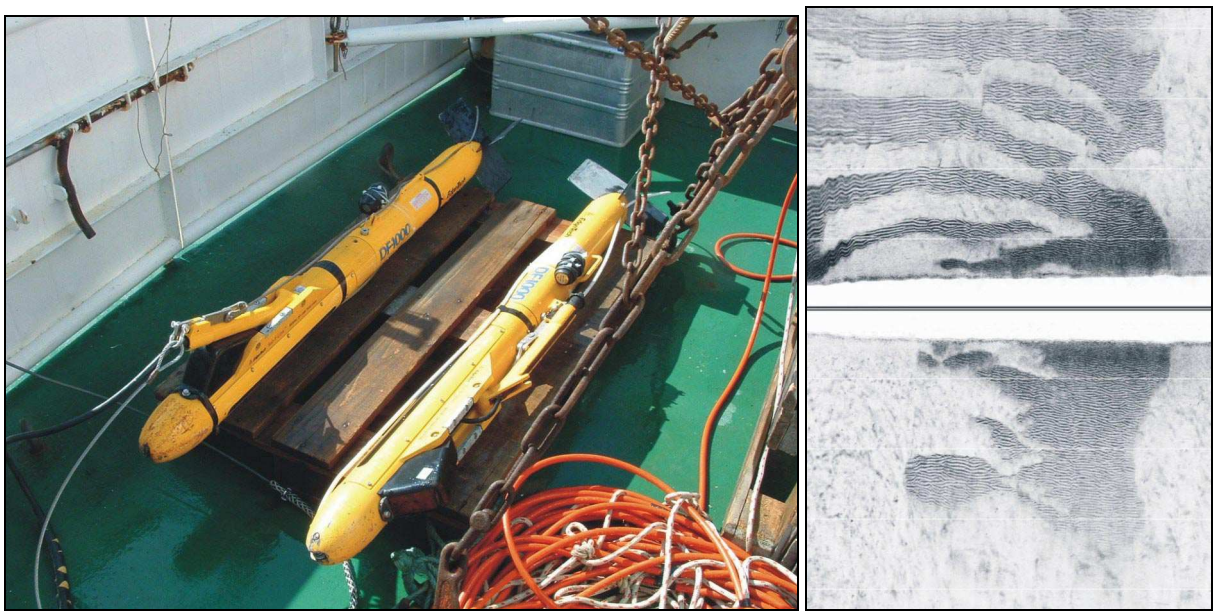


Figure 4 : Configuration du matériel et des logiciels lors des premières campagnes acoustiques REBENT

Les données brutes sont traitées en temps réel par le logiciel d'acquisition numérique (Isis Sonar de Triton ElicsSt) et rejouées en temps différé par le logiciel Caraibes 2.5 (CARtographie Appliquée à l'Imagerie et la BathymétriE des Sonars et sondeurs multifaisceaux), afin d'être corrigées des distorsions géométriques liées à la vitesse du bateau et aux variations de la profondeur.
Si les progrès techniques, en termes de souplesse d'acquisition, d'archivage numérique, de rejeu des données, permettent d'optimiser actuellement l'utilisation de ce système pour la cartographie des habitats, le dépouillement des sonogrammes et des mosaïques géoréférencées requiert un haut niveau d'expertise. Enfin, les levés acoustiques doivent être complétés par des prélèvements sédimentaires et des enregistrements par caméra vidéo, pour comprendre et valider les différentes signatures acoustiques (fig. 5b).



a b

Figure 5 : Sonar à balayage latéral DF 1000 (a) et exemples de sonogramme sur des fonds de maërl à forte dynamique sableuse (b)

b) Configuration à bord

Genavir procède à une acquisition numérique des enregistrements et à leur impression, à la demande des scientifiques, en temps réel et sur papier glacé. Il est important de conserver une restitution papier des enregistrements effectués. La configuration d'acquisition à bord, après plusieurs essais de portée, a été de lever les 3 secteurs avec une portée standard de 100 m (110 m effectif) sur la fréquence 100 kHz. Cette portée offre, pour une baie assez vaste comme celle de Concarneau, le meilleur compromis entre la détection des objets recherchés sur le fond (biocénoses) et la durée d'exécution du levé. La surface moyenne couverte est de l'ordre de 1,4 km^2/heure à la vitesse moyenne de 5 nœuds. Le recouvrement entre les profils était de l'ordre de 12%. Pour des secteurs Rebent plus petits, une portée localement de 75 m s'est révélée parfaitement adaptée à la reconnaissance des types de fonds (exemple de l'entrée de la baie de Quiberon). Pour affiner la stratégie stationnelle et prendre en compte la dynamique sédimentaire, afin de mieux comprendre dans le temps l'évolution des peuplements sélectionnés, un ou deux courts profils avec 50 m de portée (très haute définition) sur ces cibles privilégiées, comme les points de suivi du maërl, permettraient de s'assurer que le prélèvement reflète et suit bien le gisement en place (fig. 6). De la même façon, il est important pour l'étape de mosaïquage et d'interprétation, de conserver les mêmes réglages d'ouverture et de contraste du poisson sur un même secteur Rebent (*cf.* Fiches Acoustiques en Annexe 6).

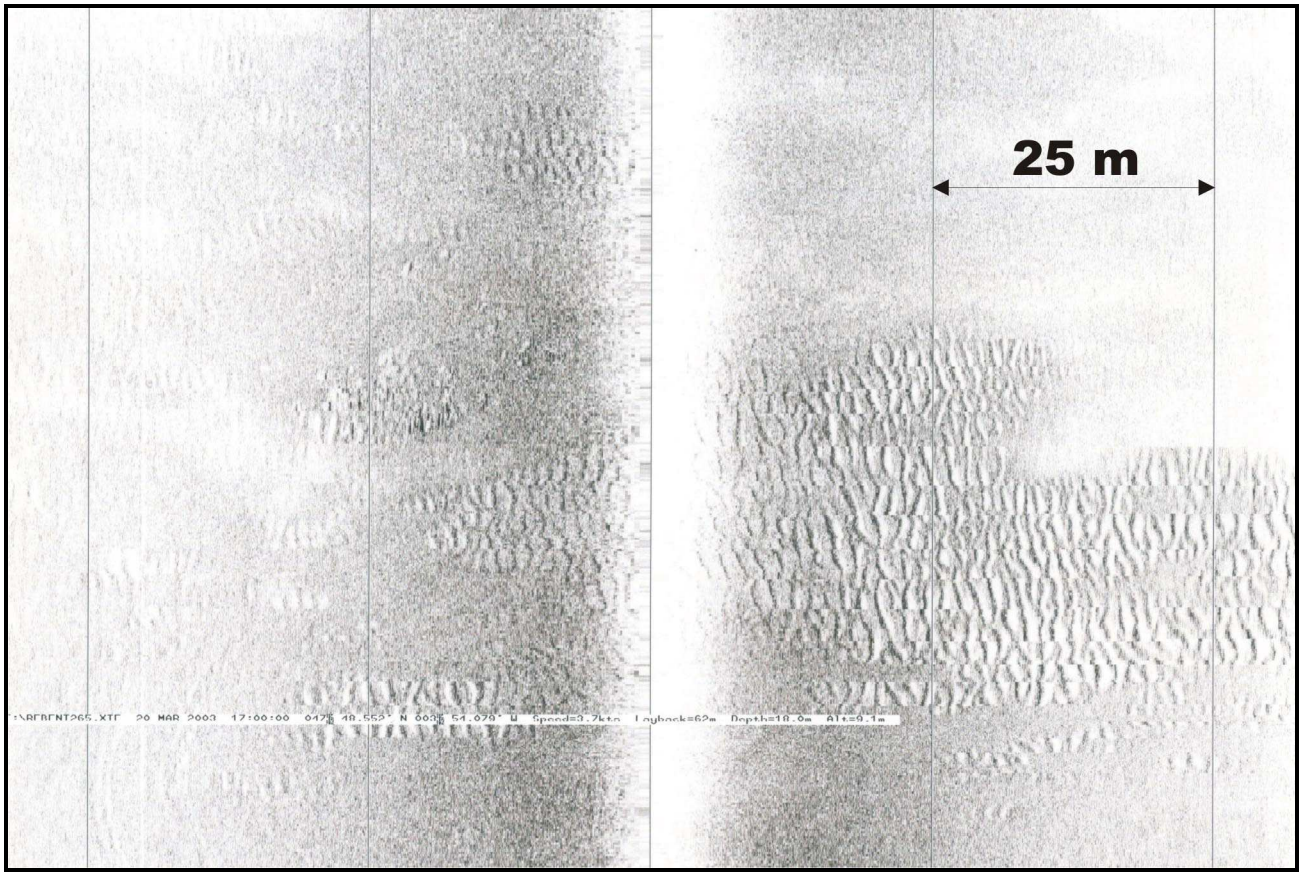


Figure 6 : Exemple de restitution d'une nappe de maërl ridée et de ses digitations en baie de Concarneau avec une portée de 50 m (DF1000)

c) Remarques "matériels"

Un certain nombre d'observations émises à la suite de la première campagne acoustique (février/mars 2003) ont été abordées en réunion de débriefing avec les responsables de la DMON (Direction des Moyens et Opérations Navals) et de Genavir, afin d'améliorer la qualité des futures données produites. Elles ont été à ce jour et pour partie, prises en considération :

(1) Les valeurs de roll (roulis) enregistrées par le poisson sont élevées (> 10°). Il semble que le pinger positionné sur le poisson, afin de le repérer en cas de perte, modifie la stabilité de l'engin et provoque un éclairage légèrement différent sur les deux voies. Plusieurs positions lors la campagne Rebent1 ont été testées sur l'arrière du poisson, dans son axe derrière la poignée, latéralement et même sur le bras de remorque. Afin de conserver la même qualité d'enregistrement, le pinger devrait disposer d'un berceau adapté, filtrant les interférences acoustiques et modifiant le moins possible la stabilité du poisson.

(2) La centrale de navigation OLEX (Polex et Solex) s'est révélée, pendant les missions Rebent1 (nouvelle installation à bord du Thalia) et Rebent2, parfaitement adaptée aux besoins du bord et à ceux des scientifiques (suivi des routes pendant le levé, positionnement des prélèvements…). Le container Bassop installé sur le pont arrière (acquisition EM1000), devrait être équipé d'un répétiteur d'écran du système afin que les scientifiques puissent être en phase avec la passerelle, et notamment au moment des pauses déjeuner ou les équipes sont réduites.

(3) La centrale d'acquisition Isis Sonar (PC et logiciel) a montré un certain nombre de faiblesses : plantages à répétition, manque de performances lorsque la portée diminue à 80 voir 50 m (augmentation du flux de données mal absorbée), position géographique fournie par le curseur à n'importe quel endroit du sonogramme régulièrement erronée après l'utilisation des touches d'avance et de retour rapides.

(4) Le module Delph map du logiciel de Triton Elics, qui permet de mosaïquer en fin de journée les profils acquis le jour-même et les jours précédents, n'est pas disponible. Or, cette fonction de post-traitement en léger différé des fichiers sonar pour la calibration, demeure encore la principale attente pour l'approche géophysique Rebent. Caraibes 2.5 a été récemment installé sur un portable dédié à l'embarquement pour les futurs missions. Mais sa "déconnexion" du logiciel d'acquisition et son utilisation (traitement séparé de la navigation) ne le rend pas aussi souple et rapide pour une pré-exploitation des données à bord et suppose de consacrer davantage de temps, a fortiori limité sur zone. Un enregistrement temps-réel sur disque dur, suivi d'un gravage quotidien sur DVD, permettrait de gagner un temps précieux dans le transfert des fichiers vers Caraibes 2.5. Cette solution pourrait-être envisagée lorsque les modules de traitement de la navigation seront intégrés à la nouvelle version de Caraibes.

d) Importance du choix dans la direction des profils sonar

A plusieurs reprises, que ce soit sur les secteurs de Concarneau ou Glénan, l'orientation des profils du sonar remorqué (DF1000) ou de coque (Reson 8101), par rapport à la direction des figures sédimentaires en équilibre hydrodynamique avec le milieu, s'est révélée être un choix déterminant pour obtenir la meilleure restitution de la nature du fond et des biocénoses, (fig. 7 et 8). Parfois, cette orientation n'est pas celle retenue initialement dans le plan stratégique de levé pour des raisons évidentes de topographie de l'avant côte, afin de concilier sécurité du matériel et durée minimum d'acquisition (girations limitées). Ces "masquages acoustiques" ont été observés principalement sur les champs de petites dunes hydrauliques (mégarides) constituant les zones vivantes de *Lithothamnium* et la couverture sédimentaire sablo-graveleuse dans les passes, autour des îles, des caps et sur les bancs sableux. Il est donc nécessaire de recouper longitudinalement ces figures afin d'optimiser, dans les meilleures conditions, le rendu acoustique.

e) Recommandations

Comme pour tous les autres systèmes acoustiques, la qualité de l'enregistrement d'un SBL peut être affectée par de nombreux bruits parasites. Un niveau de bruit élevé risque de masquer des données essentielles, notamment pour des longues portées. Il est important de les maintenir au niveau minimum afin de pouvoir utiliser au maximum le signal disponible. Ces bruits ont différentes sources :

- lorsque le poisson génère du bruit électrique, il est réduit par une mise à la terre du générateur et une bonne mise à la masse du bateau ;
- au niveau du contacteur tournant sur le treuil ;
- liés à des fuites sur le câble électroporteur (bruit de puissance) ;
- liés à une faible profondeur et par temps ensoleillé (bruit thermique) ;
- lorsque que le poisson est remorqué près de la surface ou à proximité des remous engendrés par la propulsion du bateau ;
- liés aux variations brutales de vitesse qui entraînent la formation de lignes régulièrement espacées, surtout lorsque le poisson est tracté à moins de 50 m du bateau ;
- liés à la présence de sillages de bateaux en surface ;
- au moment d'interruptions brutales de navigation qui provoquent des erreurs sur la correction et donc des distorsions à l'écran et à l'enregistrement ;
- liés à des bancs de poissons ou des bancs de méduses générant des ondulations ou des taches sur les enregistrements ;
- liés à des variations de températures ou à la présence de vagues (oscillation avec une fréquence régulière des échos).

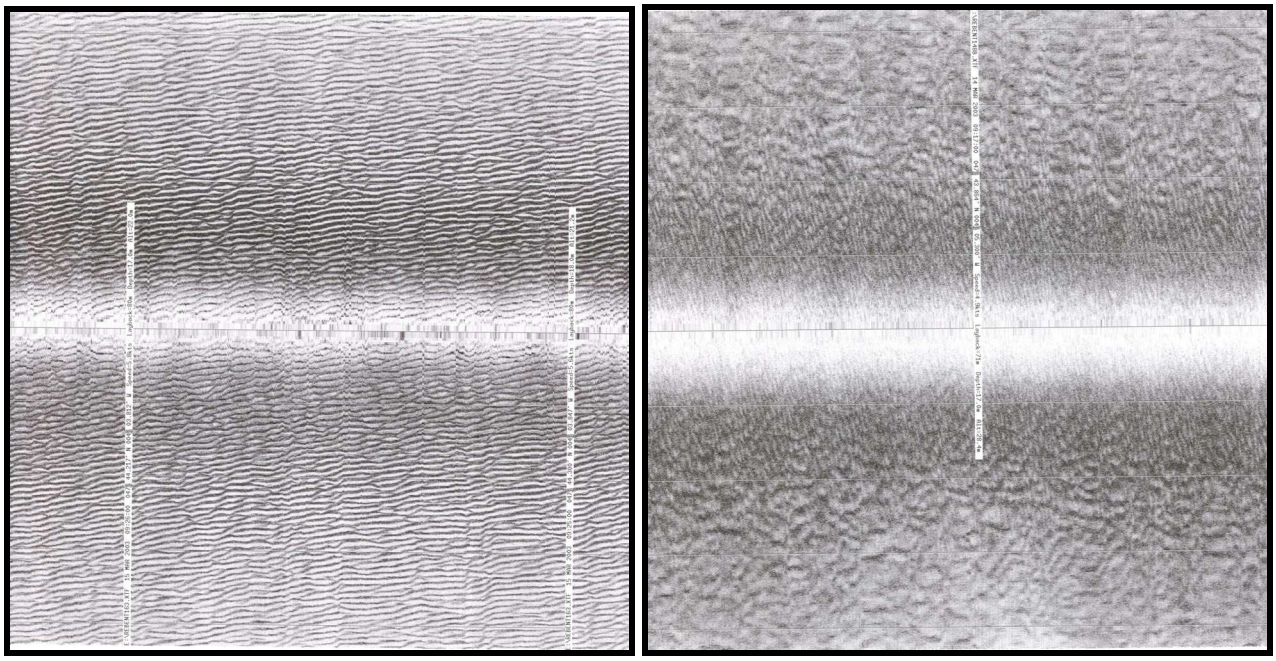


Figure 7 : Distorsion des mégarides sablo-graveleuses en fonction de la direction de profils (exemple DF1000 au NW de Glénan)

Pour conserver une bonne qualité des données tout au long du levé, les réglages doivent être conservés dans un cahier de bord informatisé (logiciel Casino+ d'IFREMER) ou une feuille de renseignements sur :

- le niveau de contraste adopté,
- l'angle d'ouverture choisi,
- la portée sélectionnée,
- l'heure de début et de fin de profil,
- les paramètres de navigation (ellipsoïde, …),
- les changements de longueur de câble filé.

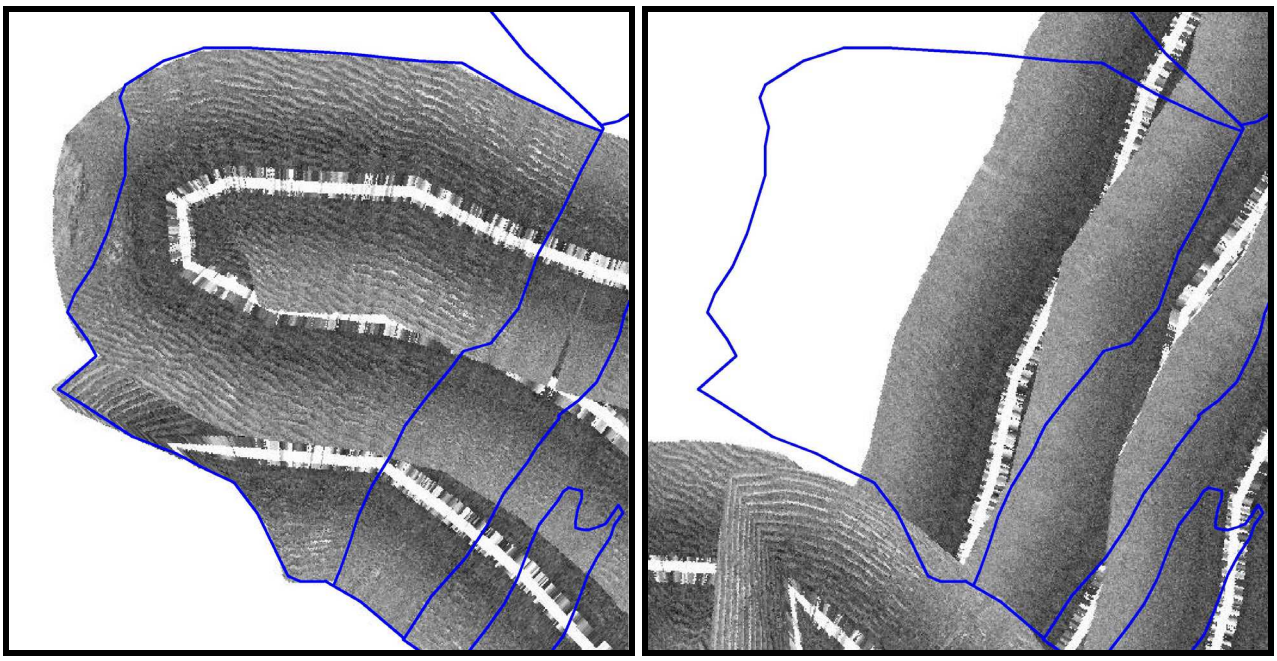


Figure 8 : Mégarides de maërl transparentes en fonction de la direction de profils (exemple Reson)

3.1.2.2 - L'option sonar à balayage latéral du Reson Seabat 8101 sur vedette Survex (Société Mesuris)

Le principe est identique, sauf que le sonar n'est plus remorqué et que la fréquence d'émission est unique et plus élevée (240 kHz). La bande côtière insonifiée sur le site de Concarneau, entre le sémaphore de Beg Meil et la Pointe de Trévignon, était limitée à l'ouest par la limite externe du levé au DF1000 avec un léger recouvrement et à l'est par l'exploitation des orthophotos littorales (An-5 en Annexe 14).

a) Configuration à bord

Les levés acoustiques avec la vedette côtière de la société Mesuris (8 jours de location), ont montré que la stratégie de balayage du fond était bien différente de celle planifiée à bord du Thalia. La proximité des reliefs et la remontée rapide des fonds, font que dans la pratique la stratégie du levé (direction de profil, portée latérale, recouvrement) s'effectue presque en temps réel, ce qui nécessite de la part du chef de mission une grande réactivité dans la conduite des travaux. L'utilisation d'un logiciel comme Arcpad 6.0 (ERSI), couplé aux orthophotos littorales et à divers shapes de synthèse, s'est révélée être un outil indispensable.

La principale difficulté vient du fait que la gamme de profondeur variant constamment, il est nécessaire de moduler la portée pour éviter une dégradation de la donnée sans forcément vouloir se placer dans les conditions optimales d'enregistrement. En règle générale, la portée latérale sélectionnée était de 2,5 à 4 fois la profondeur d'eau avec un maximum à 50 m et un minimum à 15 m. Dans des conditions de mer calme avec un léger clapot, l'acquisition peut se faire à 6,5 nœuds, avec une portée de 35 m pour 8 m de profondeur (voire moins). Si l'état de la mer se dégrade, la centrale inertielle compense moins bien les mouvements de la plate-forme et le bruit latéral augmente, nécessitant de réduire significativement la vitesse et la portée. En pratique, dans certaines zones où le gradient bathymétrique est rapide et fort (cas du rebord de terrasse sur l'avant côte entre Trévignon et Concarneau ou des Courreaux entre les îles de Glénan), il faut jongler toutes les 10 minutes avec la portée (22 changements lors de la journée du 3/10/2003). La surface moyenne couverte est de l'ordre de 0,25 km^2/heure.

Ce type de plate-forme (type pneumalu) a les inconvénients de ses avantages (manœuvrabilité, rapidité d'action, faible tirant d'eau). Elle est sensible à l'état de la mer, même lorsque celle-ci est peu agitée. Les embardées par vent arrière sont nombreuses, les louvoiements inévitables, ce qui demande au pilote d'anticiper constamment pour tenter de suivre un profil rectiligne. La qualité du mosaïquage des données d'imagerie sera fonction de la qualité de la navigation.

b) Recommandations

Le premier point concerne la phase d'acquisition des données par le logiciel. Afin de limiter le nombre de fichiers et sur notre demande, le découpage automatique des fichiers bruts enregistrés par le logiciel Reson est passé à 100 Mo. Or, la transformation en fichiers XTF importés par le module *Imisol* de Caraibes 2.5, ramène cette taille à 50 Mo. Cela représente encore de l'ordre de 40 fichiers pour un total de 5 Go, avec la bathymétrie pour une journée d'acquisition (environ 8h). Les dernières améliorations apportées à bord (février 2004) doivent permettre de segmenter les fichiers initiaux en partitions de 200 Mo.
Le second point concerne le chevauchement entre les profils. Le pilote suit en temps réel sur son écran la fauchée bathymétrique non corrigée de la marée. C'est un réel atout pour ne pas oublier de zones au fur et à mesure du levé, car celle-ci reste affichée à l'écran. Malgré cette aide au pilote, les taux de recouvrement demeurent trop importants, de 25 à 50%, rallongeant la durée et le coût de la mission. Ceci s'explique en partie par les difficultés de manœuvrabilité et par la nécessité de sonder "en aveugle" dans les zones très escarpées. Ce recouvrement est par ailleurs

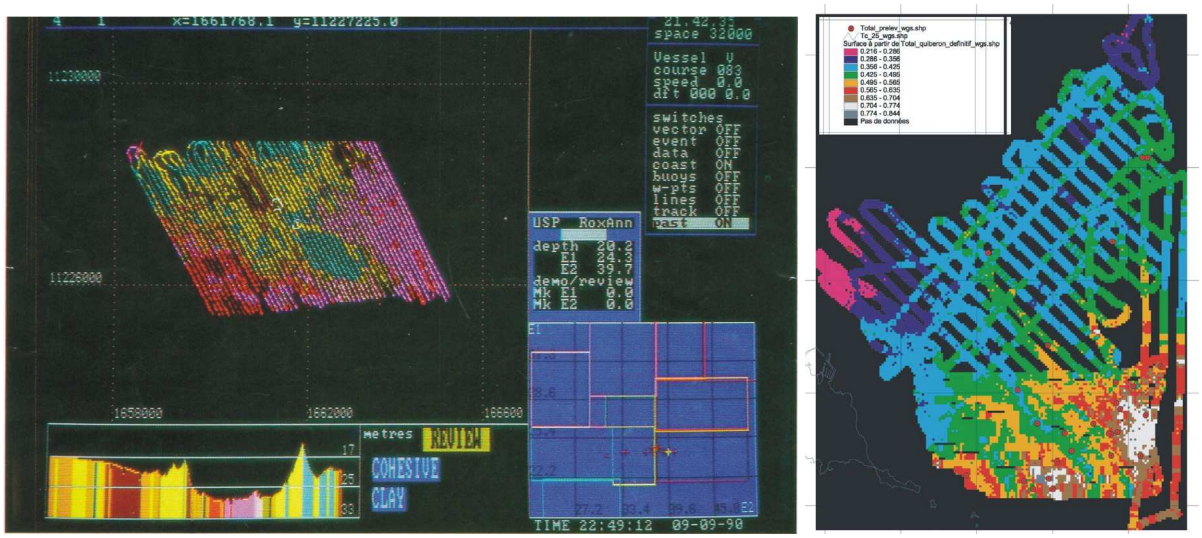
sous-estimé à bord puisque le sonar à balayage latéral “ouvre” bien plus que le sondeur multifaisceaux. C’est donc un point à améliorer.

3.1.2.3 – Le système RoxAnn (Annexe 15)

a) Principes généraux

Le système RoxAnn est un logiciel de classification automatique de la nature des fonds (SACLAF). Ce système est utilisé systématiquement depuis 10 ans dans les études anglo-saxonnes, canadiennes, américaines et australiennes de cartographie des habitats (Références en Annexe 15). RoxAnn a été développé dans les années 1990, initialement pour les pêcheurs, par la société irlandaise Marine Micro Systems Ltd. Il repose sur sa capacité à traiter en route les signaux acoustiques émis par un sondeur bathymétrique monofaisceau. L’énergie de réverbération du fond qui retourne au capteur est transformée par un boîtier électronique (USP) en indices de rugosité E1 et de dureté E2. Cette réverbération dépend de la quantité d’énergie diffusée par un élément réverbérant, elle-même fonction de la nature de l’élément et de l’angle d’incidence. E1 correspond à la réflexion directe sur le fond, alors que le second écho E2 résulte de la réflexion multiple des ondes sur le fond et sous la surface. Le temps-trajet étant plus long que pour E1, l’énergie des ondes permettant de calculer E2 est plus faible (dispersion dans le milieu). Il est donc amplifié par un boîtier. La classification s’opère en temps réel par la combinaison des deux indices (fig. 9). En effet un type de sédiment pourra en théorie être caractérisé par un couple d’indices E1/E2 moyen et son écart-type. Ainsi, un sédiment vaseux et lisse aura un couple E1/E2 plus faible qu’un sédiment grossier et rugueux.

RoxAnn est un système opérationnel autonome, composé d’un boîtier USP relié au transducteur du sondeur et à un PC ainsi qu’un GPS différentiel. Il peut fonctionner sans dégradation de la donnée jusqu’à 10 à 12 nœuds et surtout, en même temps qu’un SMF ou SBL. La cadence d’enregistrement des paramètres E1 et E2 est modulable. Pour un enregistrement toutes les 2 s, le volume des fichiers de données acquis en une journée tient sur une disquette (1,4 méga octets). RoxAnn est donc un système de cartographie souple d’utilisation et de moyenne à basse résolution (plurimétriques à pluridécamétriques), mais peut-être complémentaire des systèmes d’imagerie acoustique.



a b

Figure 9 : Exemples de restitution des données RoxAnn en temps réel (a) et d’interpolation sur Quiberon (b)

b) Configuration à bord

La principale difficulté dans ce système qualifié de “basic” est de trouver un PC avec deux ports séries (un pour la connexion DGPS, l’autre pour l’arrivée des données de l’USP) fonctionnant

sous Windows 98. L'USP avait été configurée par les techniciens de Stenmar pour fonctionner avec la puissance et la fréquence (200 kHz) du sondeur Furuno du bord (FE 881). Le logiciel d'acquisition était Searano.

La mise en œuvre du système passe par une phase préliminaire de pré-calibration électronique sur tout nouveau secteur à lever. Elle consiste à repérer un fond homogène de vase ou de sables fins (fonds étalons) et d'en définir les couples moyens de E1/E2 en fonction de la fréquence du sondeur. Cette étape est décrite dans le manuel Stenmar. Le constructeur préconise de réaliser la calibration du système pour un sondeur à 33 kHz sur un fond sableux entre 30 et 50 m de profondeur et un fond vaseux dans un port à 200 kHz. Le gain de l'amplificateur est alors ajusté pour produire un signal suffisant pour détecter ces échos. L'objet de cette calibration électronique sur le site est de fournir par la suite des valeurs brutes de E1 et E2 cohérentes, sans avoir à retoucher au gain.

L'ouverture du sondeur et la profondeur vont contrôler la résolution théorique du système sur le fond (tab. 2). Parmi les paramètres nécessaires au logiciel d'acquisition, le choix de la cadence d'acquisition est indispensable et joue un rôle important comme la puissance de l'émetteur dans l'appréciation des données E1 et E2. Elle peut varier de quelques secondes à plusieurs minutes. A la différence du logiciel d'acquisition RoxMap, Searano ne conserve que la dernière donnée enregistrée et non pas la valeur d'intégration des données sur la période d'acquisition. Si, en terme de résolution, l'effet de lissage est atténué, Searano enregistrera davantage le "bruit ambiant".

	Ouverture à 7°	Ouverture à 15°
Profondeur	Diamètre au fond (m)	Diamètre au fond (m)
5	3,7	20,3
10	7,5	40,5
15	11,2	60,8
20	15,0	81,1
25	18,7	101,4
30	22,5	121,6

Tableau 2 : Résolution d'un sondeur vertical sur le fond en considérant une empreinte circulaire

Il n'existe pas de paramétrage idéal qui convienne à toutes les situations. C'est d'autant plus vrai que la zone à explorer possède un spectre bathymétrique important. Un fond plat à 10 m de profondeur, prospecté à la vitesse de 5 nœuds, est théoriquement complètement insonifié avec un léger recouvrement toutes les 3s, à 20 m toutes les 6s (tab. 3). Il faut donc faire un compromis dans le choix de la cadence d'échantillonnage en ayant une bonne connaissance au préalable des profondeurs min. et max. du secteur.

Ouverture à 7° - Vit 5 nœuds		Profondeur (m)					
Acquisition (s)	Distance parcourue (m)	5	10	15	20	25	30
1	2,6	-1,1	-4,9	-8,6	-12,4	-16,1	-19,9
2	5,1	1,4	-2,4	-6,1	-9,9	-13,6	-17,4
3	7,7	4,0	0,2	-3,5	-7,3	-11,0	-14,8
4	10,3	6,6	2,8	-0,9	-4,7	-8,4	-12,2

Tableau 3 : Valeurs théoriques de recouvrement entre la cadence d'acquisition et la profondeur

La période d'acquisition a été fixée pour les 3 secteurs Rebent à 3s, car elle représente un bon compromis pour des fonds entre 10 et 25 m de profondeur avec ce sondeur. Elle permet d'insonifier tout le fond le long du profil avec un léger recouvrement pour les profondeurs les plus faibles.

c) Recommandations

Ce système s'est avéré vite opérationnel après quelques tâtonnements. Avec le recul et l'analyse des premiers résultats, son utilisation à bord sollicite quelques remarques :

- il est recommandé que le système ait son propre système de positionnement différentiel, même s'il peut recevoir la navigation de CINNA ;
- une fois la calibration effectuée, il ne s'agit plus de moduler sur un même secteur le gain sur le panneau arrière de l'USP ;
- afin de balayer la plus large signature de faciès bio-sédimentaires du secteur reconnu, il est conseillé de procéder préalablement à deux grands profils sécants traversant toute la zone pour, s'il y a lieu, ajuster les réglages sur le logiciel d'acquisition ;
- sauvegarder les données en fin de journée.

Les SACLAF peuvent fournir des données de qualité variable du fait des changements de conditions de mer, des variations de l'électronique du système ou d'un portage du système sur une autre embarcation. Les effets ne sont pas toujours évidents à détecter. Les données douteuses doivent être éliminées au moment du post-traitement. La qualité des données brutes est fonction :

- de l'état de la mer. Les phénomènes de cavitation sous la base provoquent des interruptions dans la transmission/réception des ondes. Cet effet a lieu également pendant les girations ;
- de l'état de l'électronique (vieillissement, connections fragiles, dérive dans le temps…) ;
- des interférences avec les autres systèmes électroniques embarqués (sondeur, émissions radio…) ;
- de la vitesse trop lente du bateau ;
- de la durée de prospection sur zone. Dans la mesure du possible, la zone à prospecter doit être cartographiée dans un temps réduit pour conserver les paramètres de configuration identiques et les mêmes conditions sur le plan d'eau.

Pour contrôler la qualité des données acoustiques du système jour après jour :

- les réglages et les conditions du levé doivent être consignés ;
- des points de contrôle ou des profils RoxAnn de référence doivent être choisis dès le début de la mission et faire l'objet d'une surveillance en début et fin de journée (chenal de sortie du port par exemple), afin d'appréhender d'éventuelles dérives du système dans le temps.

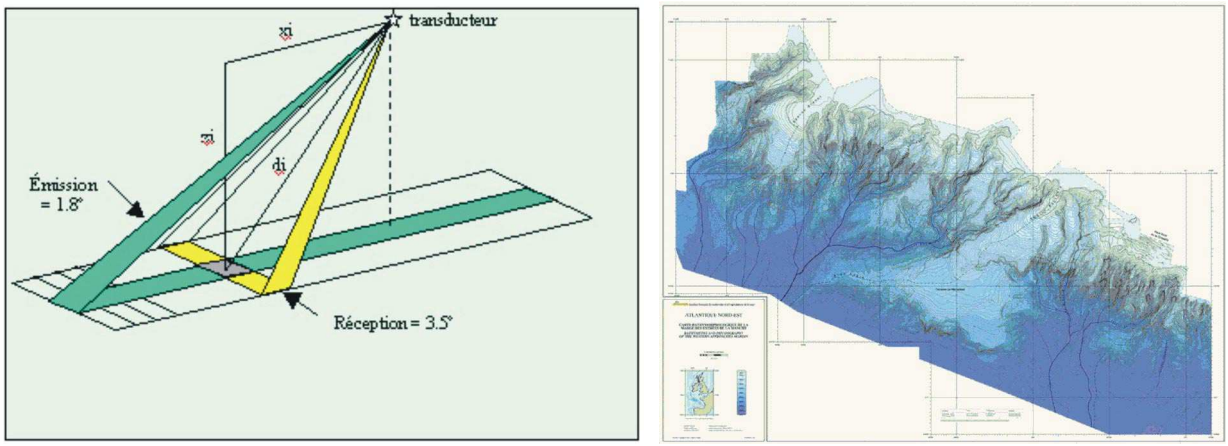
3.1.2.4 – Les sondeurs multifaisceaux petits fonds : exemples de l'EM1000 de la société Simrad et du Seabat 8101 de la société Reson (Annexe 17)

a) Principes généraux

Ces systèmes acoustiques permettent d'obtenir, de manière précise et rapide, des relevés topographiques du relief sous-marin (bathymétrie) et des images de la réflectivité locale du fond (imagerie). Un sondeur multifaisceaux mesure simultanément la profondeur selon plusieurs directions déterminées par les faisceaux de réception du système. Ces faisceaux forment une fauchée perpendiculaire à l'axe du navire. On explore ainsi le fond sur une large bande (de l'ordre de 5 à 7 fois la profondeur), avec des vitesses supérieures à celles utilisées pour un sonar remorqué. La plupart des sondeurs multifaisceaux fonctionnent selon la technique dite des faisceaux croisés (fig. 10). Une impulsion sonore est émise au travers d'un lobe d'émission étroit dans la direction longitudinale (de l'ordre de 1 à 5 degrés) et large transversalement (typiquement 150 degrés). La réception se fait à l'aide de faisceaux étroits dans le plan transversal (de l'ordre de 1 à 5 degrés). Pour chaque faisceau de réception, la zone du fond explorée ("cellule insonifiée") est l'intersection entre le lobe d'émission et le faisceau de réception. Pour déterminer les positions géographiques des mesures bathymétriques de part et d'autre du bateau, ces systèmes sont équipés d'une centrale inertielle qui corrige l'attitude du navire et calcul le cap. De la même façon, pour corriger la courbure des rayons sonores, la célérité est

mesurée, soit en station à partir d'un bathycélérimètre de coque ou d'une bathysonde, soit en route à l'aide de sondes perdables : XBT (mesure de la température) ou XCTD (température et conductivité).

La résolution de l'EM1000 à 100 m de profondeur est de 50 cm à la verticale du bateau, et latéralement de 1,5 m à 400 m de l'émetteur. Contrairement au sonar latéral, où la fauchée insonifiée est constante, la largeur d'investigation pour un SMF dépend de la hauteur d'eau. Contrairement à une idée reçue, la précision des données des SMF n'est pas supérieure à celle des sondeurs monofaisceaux. Les données de bathymétrie acquises par ces sondeurs respectent les mêmes normes hydrographiques en terme de précision verticale.



a b

Figure 10 : Principe de fonctionnement d'un SMF (a) et exemple de restitution bathymétrique (b)
(édition IFREMER)

b) Recommandations

Les centrales d'attitude sont sujettes à dérive. Il est donc nécessaire de contrôler régulièrement (1 à 2 fois annuellement) leur bon fonctionnement, notamment par une calibration en roulis et tangage. Des profils peuvent être réalisés en début et fin de campagne sur une zone test. Dans le cas d'un sondeur grand fond, cette zone comporte des fonds très plats, très bien connus par sondage au monofaisceau par exemple. Il s'agit alors de comparer les sondes SMF recueillies avec le modèle numérique de référence. Les courbes écart-moyen et écart-type, en fonction du numéro de voie, fournissent une bonne idée de la précision du sondeur. Les profils traversiers permettent également de comparer les sondes communes avec le levé régulier. En cas d'écarts importants, on peut remettre en cause les profils de célérité utilisés. Pour cette raison, au moins deux tirs de sondes XBT (Sippican) sont réalisés par jour pour mesurer la température sur la colonne d'eau. Elles permettent une acquisition rapide et directe de la vitesse du son jusqu'au fond. Leur nombre varie en fonction de la stratification de la masse d'eau (importante en estuaire).

3.1.3 – La gestion et la vérification des données à bord

La diversité des données brutes propres à chaque capteur et les volumes d'informations géoréférencées qui en découlent sont très importants pour chaque mission (plusieurs dizaines de Giga octets enregistrés par campagne). La gestion en temps réel ou léger différé des informations provenant des logiciels d'acquisition (fig. 4 : Arcpad, Olex, Casino+, Vidéonav) avec les SIG (Rollet et *al.*, 2004), permet d'optimiser à bord la stratégie de levé, de vérifier que le plan d'échantillonnage est complet et fondamentalement de conserver la précision de localisation métrique à sub-métrique obtenue en surface par GPS différentiel ou cinématique.
C'est ainsi que les données brutes RoxAnn peuvent être examinées à bord après quelques modifications de format sous un tableur comme Excel. Elles sont exportées dans un fichier dbase ou txt, lu par Arcview, avec pour chaque enregistrement les coordonnées du point, les valeurs de E1, E2, la

profondeur, l'heure et la date. Les cartes de rugosité et de dureté sont alors rapidement accessibles et les données manquantes ou aberrantes seront plus facilement détectées afin de corriger le semis de points avant de quitter le secteur. Enfin, cette gestion à l'écran facilite le choix des sites d'échantillonnage pour la calibration des couples RoxAnn E1/E2. L'utilisation à bord d'un carnet de quart informatisé tel que Casino+ (IFREMER) permet d'exporter les données géoréférencées acquises pendant la journée dans un SIG (positions des prélèvements, de début du profil vidéo, etc.). La gestion du plan d'échantillonnage gagne en efficacité avec la possibilité d'y apporter des corrections et de le faire évoluer s'il y a lieu.
Enfin les données numériques du sonar à balayage latéral comme celle du sondeur EM1000 peuvent également être rejouées, soit dans la journée par un technicien dédié au traitement sur Caraibes 2.5, soit en partie, de retour à quai, en prenant en compte les modifications souhaitées (*cf.* § 3.1.2.1c). Des MNT (Modèles Numériques de Terrain), des mosaïques basses résolutions ou des cartes des limites de fauchée (module *Visnav*) sont générés et exportés sous SIG pour être confrontés aux données de vérité terrain.
Le logiciel d'acquisition ISIS sonar de Triton Elics rejoue, une fois l'acquisition numérique terminée, les profils un à un, et propose avec le pointeur de fixer les coordonnées des signatures acoustiques à échantillonner. Dans le cas d'un levé acoustique par petits fonds, avec une embarcation légère et une équipe scientifique restreinte, le suivi des profils, l'acquisition de la navigation par DGPS et de la sonde peuvent se faire depuis un PC portable équipé du logiciel Arcpad 6 de la société ESRI (fig. 3 et 4 en Annexe 14). La superposition des données acquises en temps réel avec différentes couches d'informations ponctuelles, linéaires ou surfaciques, photos géoréférencées (orthophotos littorales) ou cartes raster, assure une plus grande opérationnalité dans la conduite du levé.

3.2 – Le traitement des données

3.2.1 - Les prélèvements sédimentaires

L'analyse granulométrique a été confiée à un bureau d'étude (ALIDADE). Les échantillons grossiers sont tamisés à sec sur une colonne de tamis à la norme AFNOR. Pour ceux contenant une fraction vaseuse non négligeable, les échantillons sont préalablement passés sous l'eau sur un tamis à 50 µm pour faire la part des fines dans le poids du sédiment. Les coupures retenues pour calculer les pourcentages des différentes classes (fig. 1 en Annexe 1) sont celles de la norme européenne ISO/DIS 16665 (traitement des échantillons de la macrofaune des sédiments meubles). L'ensemble des caractéristiques des échantillons sédimentaires prélevés dans le cadre du Rebent est résumé dans une fiche de synthèse granulométrique (Annexe 2). Deux classifications ont été retenues :

- La classification EUNIS relative aux habitats marins (Connor et al., $1997_{a,b}$), selon le diagramme de Folk (1954) modifié (fig. 2 en Annexe 1) : les types sédimentaires sont fonction des proportions en graviers, sables et vases avec une limite à 80 % pour considérer une classe comme dominante et 20 % pour un faciès de mélange.
- La classification sédimentaire selon Vaslet et al. (1978) et Lesueur et Klingébiel (1985) (modifiée selon la classification carte G SHOM) : Les types sédimentaires sont fonction de la médiane, de la teneur en vase, des pourcentages des différentes classes sédimentaires et du pourcentage en carbonate (fig. 3 en Annexe 1). Cette matrice de classification résulte des grandes études en domaine subtidal menées depuis les années 60 en Manche et en Atlantique (Hommeril, 1967 ; Cabioch, 1968 ; Larsonneur, 1971 ; Chassé et Glémarec, 1976 ; Dauvin, 1997).

3.2.2 – Les systèmes acoustiques

Les données des systèmes acoustiques font l'objet de traitements multiples qui visent à épurer les mauvais enregistrements des fichiers bruts, afin de ne conserver et de gérer que les lots de données validées. Ces traitements sont présentés dans le détail dans les fiches outils (Annexes 15, 16 et 17).

3.2.2.1- Le sonar à balayage latéral DF1000 EdgetechSt

a) Traitement de la navigation

La première étape consiste à traiter la navigation du poisson DF1000. Elle est générée dans un premier temps par Genavir avec un fichier tenant compte du layback (longueur de câble filée + distance du treuil à l'antenne de réception DGPS). La position du poisson remorqué est donc corrigée uniquement longitudinalement. Des scripts en langage awk permettent sous Linux ou Unix de formater ces fichiers (un point toutes les 10 s) avant les opérations de lissage et d'interpolation linéaire (perte temporaire de la réception DGPS) avec le logiciel Trinav 3.5. Les valeurs aberrantes de layback entraînent un décrochement des limites remarquables au moment du mosaïquage des profils sous Caraibes 2.5 (fig. 11). Dans le cas de Concarneau, ces erreurs viennent d'un disfonctionnement répété de la poulie compteuse à bord.

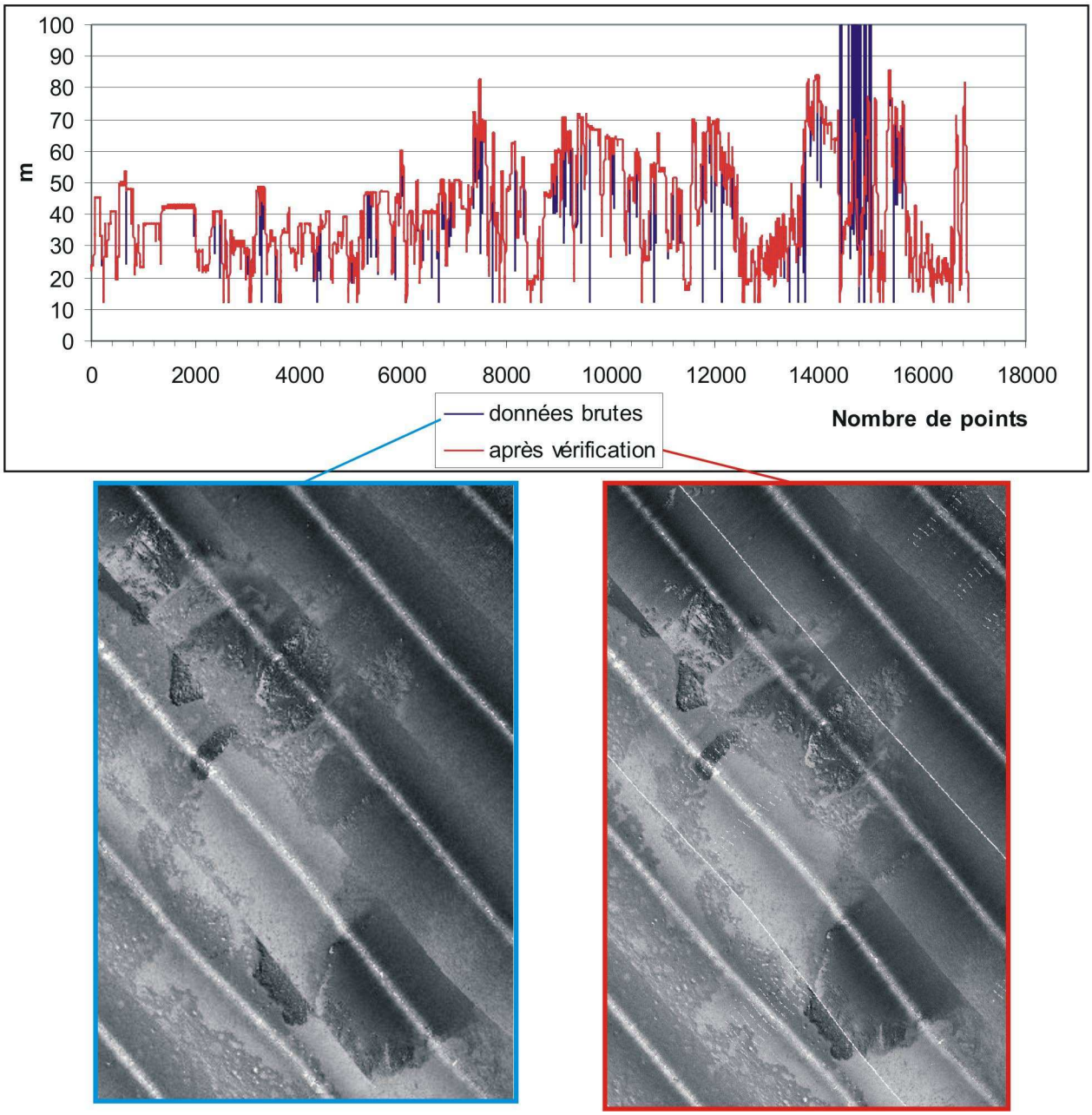


Figure 11 : Effets de valeurs aberrantes de layback sur le mosaïquage en baie de Concarneau

b) Mosaïquage (Caraibes 2.5) et vectorisation (Arcview)

La méthode consiste à mosaïquer les profils dans une chaîne de traitement spécifique du logiciel Caraibes 2.5, utilisée et améliorée depuis plusieurs années par le département de cartographie de DRO/GM (Direction des Recherches Océaniques/Géosciences Marines, IFREMER) en collaboration avec le département ESI (Equipements Scientifiques et Informatiques embarqués) de la Direction des Navires océanographiques et de l'Intervention Sous-marine (fig. 12). La gestion sous Arcview du fichier de navigation, corrigé du layback, permet de segmenter le secteur prospecté en fonction des directions de profils qui influencent directement la constitution de la mosaïque (module *Spreamo*). Les groupes de profils ainsi constitués vont fournir autant de mosaïques intermédiaires. Ces mosaïques sont exportées (module C*artim*) en raster géoréférencé (format pbm) puis transformées en raster au format jpeg ou ecw (format Ermapper). Différents essais ont permis de dégager deux niveaux de restitution :

- Un niveau "dégradé" (facteur 10) en prenant comme pas de terrain, un pixel de 1m (500 dpi pour les mosaïques intermédiaires et 1300 dpi pour la mosaïque globale au niveau du module Cartim). La fusion de ces mosaïques (module Ermomo) fournit la mosaïque de référence à l'échelle du secteur d'étude. Les temps de traitement et la taille du fichier définitif restent raisonnables (tab. 4).
- Un niveau "optimisé" (dégradation d'un facteur 3) en prenant comme pas de terrain, un pixel de 30 cm (800 dpi pour la restitution dans Cartim). L'explosion des tailles de fichier (facteur 11) et du temps de calcul, proscrit la fusion des mosaïques intermédiaires en une mosaïque unique (taille estimée à 3,32 Go !).

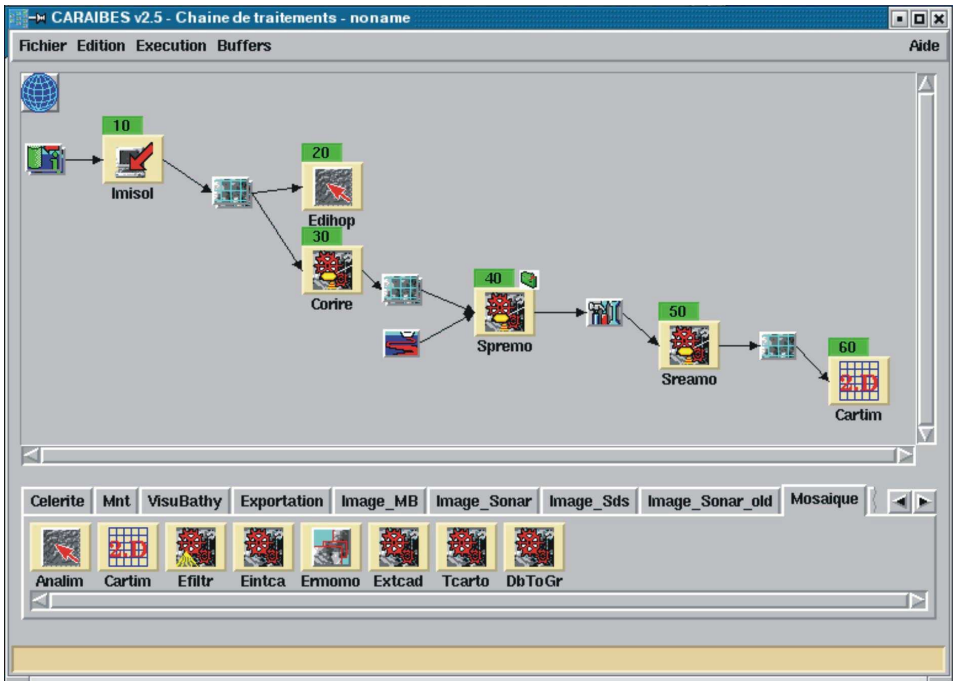


Figure 12 : Chaîne de traitements des données sonar dans Caraibes 2.5

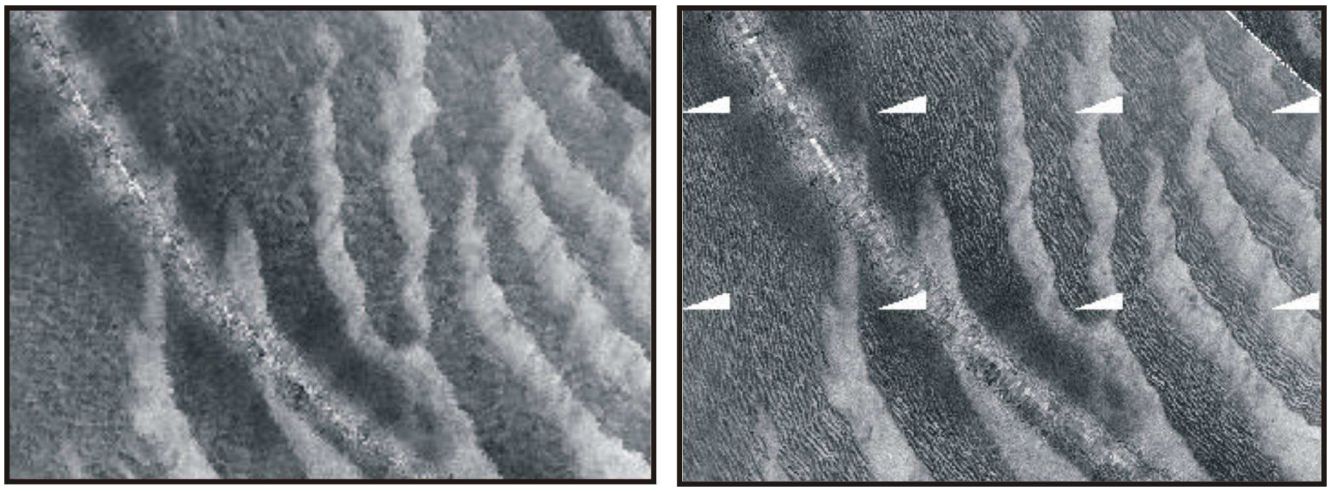
Le niveau "optimisé" à 0,3 m est celui à partir duquel la vectorisation des faciès acoustiques sous Arcview est réalisée. En effet, les figures sédimentaires métriques (petites dunes hydrauliques ou mégarides, sillons d'érosions, queues de comète) y sont encore conservées (fig. 13). Ce sont des éléments fondamentaux pour la compréhension de ces environnements et qui permettent d'apprécier la dynamique sédimentaire des dépôts en place (direction et sens du transport sédimentaire en charriage sur le fond).

Les limites les plus remarquables (platiers rocheux, nappes ridées, fort contraste granulométrique ou de rugosité…) sont vectorisées directement à l'écran sous Arcview, dans la projection et l'ellipsoïde de

réalisation de la mosaïque (Mercator WGS84 par exemple). Elles sont imprimées depuis une layout sur calque polyester indéformable à l'échelle du 1/5000ème avec la navigation corrigée surimposée. Ces polygones vont servir de points d'accroche lors du dépouillement manuel des bandes papier. En effet, la perception de variations ténues de niveaux de gris ou de rugosité n'est pas facilement décelable sur les mosaïques intermédiaires et sur la mosaïque générale du fait des effets de lissage ou de rehaussement de contraste effectués (modules *Analim* ou *Edihop*).

	Caraibes 2.5	
	Pas de 1m	Pas de 0,3 m
Nom du fichier	Taille (Mo)	Taille (Mo)
Concarneau1.imo	48,7	540,4
Concarneau2.imo	20,5	227,1
Concarneau3.imo	33,3	369,6
Concarneau4.imo	17,2	191,3
Concarneau5.imo	32,6	371,8
Concarneau6.imo	4,2	51,8
Concarneau7.imo	40,2	446,8
Concarneau7+.imo	20,7	229,9
Concarneau8.imo	11,4	112,8
Concarneau9.imo	6 ,5	32,9
Concarneau10.imo	13,7	176,9
Concarneau-total.imo	299,5	3324,2 !

Tableau 4 : Détail des fichiers mosaïques en sortie de *Sreamo* pour la baie de Concarneau



a b

Figure 13 : Extraits de mosaïque sans mégarides de maërl avec un pas de 1 m (a) et montrant la couverture ridée avec un pas de 0,3 m (b) (résolution d'origine égale à 0,1 m)

Le dépouillement manuel des bandes papier comporte :

(1) l'impression sur calque polyester des polygones remarquables numérisés à l'écran et des routes poisson avec un top horaire toutes les 10s à l'échelle du 1/5000ème pour une portée de 100 m,
(2) le dépouillement des bandes sonar avec report des principales limites de faciès acoustiques,
(3) l'intercalibration entre les minutes de dépouillement d'un même secteur,
(4) le géoréférencement des minutes scannées à 300 dpi min. (600 dpi recommandée),
(5) la numérisation avec labélisation des informations pour gestion sous SIG (fig. 14).

c) La calibration des faciès acoustiques : exemple de la baie de Concarneau (Annexes 7 et 10)

Le faciès acoustique blanc

Le faciès blanc homogène (FA n°1 en Annexe 6.1) s'observe sur la côte Est de la baie. Les plus grandes nappes sont localisées au pied du talus littoral limité au droit de la pointe de la Jument par l'isobathe 20 m et 25 m au droit de la pointe de Trévignon, c'est à dire sur la bordure orientale de la grande vasière qui occupe la partie centrale de la baie. Deux poches plus réduites drapent la dépression de la Jument par 15 m de profondeur. Les autres nappes sont anecdotiques par leur taille et souvent disséminées entre les hauts fonds rocheux à l'entrée du chenal du port de Concarneau et entre les platiers rocheux à l'ouest de Beg Meil. Les prélèvements effectués à la benne, remontent un godet bien rempli avec à sa base, une vase à *Maldane* ou *Haploops* d'aspect pâteux, coiffée en surface, d'une crème de vase plus fluide. Il s'agit d'une vase pure (83% particules inférieures à 50 µm) particulièrement homogène et pauvre en macrofaune. C'est un dépôt par remplissage des dépressions. L'imagerie sonar montre que de nombreux cratères au pied de la terrasse sont ennoyés sous cette couche de vase molle (FA n°7 en Annexe 6.1). Le mode de prélèvement à la benne, que ce soit à la benne Shipeck et surtout à la benne Hamon, se prête difficilement à l'observation de ces dépôts superficiels. En effet, la partie supérieure de l'échantillon est le plus souvent retournée, et donc inaccessible à l'observation sans remanier profondément l'échantillon. Un prélèvement par carottier serait plus adapté pour décrire ce mode de sédimentation. L'origine de cette vase est inconnue (redistribution à la côte des boues de dragage du port de Concarneau ou produit d'érosion des vases de la partie centrale de la baie ?). Sa présence n'est pas mentionnée sur les cartes existantes (Atlas de Chassé et Glémarec, 1976 ; Carte G 7146). Ce type de dépôt n'est probablement pas pérenne mais se morcelle en fonction des saisons et des périodes d'agitation.

Le faciès blanc nuageux est réparti de manière diamétralement opposée entre les fonds sablo-envasés à l'entrée de la baie de la Forêt vers –15 à –10 m de profondeur (FA n°2 en Annexe 6.1), et les fonds ridés de sable fin à moyen, en écharpes autour du banc de maërl des Moutons (FA n°3 en Annexe 6.1). Ce faciès est peu différent du blanc limpide et sa texture nuageuse s'apparente à un bruit acoustique généré dans des conditions de faible profondeur (davantage d'échos parasites), par la dégradation de l'état de la mer enregistrée ces jours.

- Entre la sortie du port de Concarneau et Beg Meil, les 3 échantillons remontés dans ce faciès présentaient également les mêmes caractéristiques d'une vase "fraîchement" déposée mais d'épaisseur plus faible et qui s'est mélangée plus facilement au moment de l'échantillonnage avec le sédiment en place (vase-sable très fin, réduite et très odorante) ;
- A l'est des Moutons, la benne Shipeck a remonté peu de sédiment lorsqu'il s'agissait d'un sable fin propre, compact, parfois légèrement envasé sur la frange orientale de ce faciès et un sable moyen ocre, meuble, bien trié et plus coquiller sur sa frange occidentale. Les prélèvements effectués en limite de ce faciès (RB2_Sh7, RB1_Sh11) sont contaminés par des éléments carbonatés plus grossiers (maërl, coquilles entières de vernis et pecten) apportés par la dynamique sédimentaire depuis les Moutons.

Le faciès acoustique gris clair

Il se rencontre sous deux aspects : une texture homogène (FA n°4 en Annexe 6.1) en périphérie du faciès blanc nuageux, et sous une <u>forme tachetée</u> (FA n°5 en Annexe 6.1) au centre de la baie et au sud de Beg Meil décrite au paragraphe 4.1.2.2b. En ce qui concerne le faciès <u>gris clair homogène</u> :

- Au Nord (zone 1), la benne shipeck a remonté peu de sédiment, nécessitant de réaliser à plusieurs reprises des réplicats. Le fond constitué d'un sable très fin homogène (50%) mélangé à des mottes de vase compactes (24%) est relativement résistant à la pénétration de cette benne (50 kg). L'unique échantillonnage à la benne Hamon (200 kg) montre en réalité qu'il s'agit d'une pellicule sableuse recouvrant une vase compacte mais moins sableuse que pour le faciès gris moyen homogène (zone 3, FA n°6 en Annexe 6.1). Le profil vidéo à la

troïka RB2_Tr6 traverse un fond relativement dépourvu d'aspérités, laissant affleurer occasionnellement des polychètes *Sabellaria*, se rétractant au passage de l'engin ;

- Au sud (zone 2), le sédiment analysé est un peu moins vaseux (10% contre 24%) et plus grossier (41% de sable fin et 26% pour le cumul Gr/Sg/Sm). La composition granulométrique est assez proche de celle correspondant à la zone 3 du faciès gris moyen homogène. C'est un faciès relativement rugueux et texturé qui témoigne de la pression de la pêche sur le fond. Il est donc difficile d'expliquer pourquoi le SBL a différencié ces deux signatures (l'une plus sombre que l'autre). Le système RoxAnn semble apporter quelques éléments d'explications puisqu'il fait apparaître un niveau plus élevé de rugosité et de dureté pour la zone 3 du FA n°6 en Annexe 6.1. Des analyses granulométriques complémentaires permettraient d'affiner l'interprétation.

Le faciès acoustique gris moyen

Il occupe l'essentiel des fonds de la baie. Il se différencie selon une texture homogène, à cratères ou ridée. Plusieurs profils de vidéo sous-marine ont recoupé ces faciès lors de la mission Rebent2 (AN-10 en Annexe 14).

(1) Texture homogène (FA n°6 en Annexe 6.1) :
- Zone 1 : Cette unité sédimentaire apparaît dans la continuité des vases à *Haploops* au centre de la baie et s'étale au devant du littoral rocheux de Beg Meil. C'est une zone abondamment chalutée. Les bennes sont souvent à demi-remplies. Le sédiment (VSft) se compose d'une vase plus compacte, réduite en profondeur, avec un peu de sable très fin propre. Le fond est recouvert localement de nombreuses petites ophiures, de turritelles vides et de maldanes dont l'extrémité des tubes sont visibles au bâti ponctuel (RB1_Sh29 et RB1_Sh57). La transition avec le faciès à cratères est assez progressive et se traduit par la colonisation de plus en plus forte du substrat par des petites colonies d'*Haploops*.
- Zone 2 : Il s'agit en réalité de 3 petits secteurs, vierges de toutes figures sédimentaires d'échappement (pockmarks), emprisonnés dans la couverture vaseuse à cratères (FA n°7 en Annexe 6.1) qui occupe l'ensemble de cette passe. Bennes Hamon et Shipeck sont généralement bien remplies, composées d'une vase collante (VStf) relativement riche en buissons d'*Haploops* (RB2_Bh15). La densité en *Haploops* semble cependant moins forte que dans le faciès à cratères.
- Zone 3 : Localisée en limite ouest de la couverture sablo-graveleuse organogène des Moutons, les échantillons découvrent un sédiment composé en surface d'un sable fin brun (42% du poids du sédiment) mélangé à quelques éléments grossiers (gravillons, coquilles brisées) et reposant sur une vase sableuse peu compacte. Il s'agit bien d'un faciès de transition (SfV) avec le milieu envasé du centre baie sur lequel la dynamique sédimentaire projette vers l'Est Nord-Est sables coquilliers et débris de maërl.

(2) Texture à cratères (FA n°7 en annexe 6.1) : C'est un faciès tout à fait spectaculaire qui n'avait jamais été mis en évidence dans les travaux concernant cette baie. Ces figures sont couramment décrites par plus grande profondeur (Hovland et Judd, 1988), mais beaucoup plus rarement à quelques encablures du littoral. Localisé dans l'axe de la dépression qui borde la terrasse entre Concarneau et Trévignon, il constitue un véritable champ de pockmarks de quelques mètres à plus d'une vingtaine de mètre de diamètre. Il se poursuit plus au sud, au moins jusque dans le chenal qui sépare Glénan des Pourceaux (FA n°6 en Annexe 6.2 ; Ehrhold, 2001a). Les cratères présentent exceptionnellement une orientation en chapelet. Ce phénomène a également été observé ponctuellement dans le fond de la baie de Quiberon (FA n°4 en Annexe 6.1). Leurs profondeurs sont modestes, de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres de hauteur et leurs rebords émoussés permettent à la troïka de glisser sans être brutalement stoppée. Les nombreux échantillons remontés de ces fonds, sont composés d'une vase compacte colonisée en surface par des biocénoses d'*Haploops* en très forte concentration. Elles peuvent constituer des peuplements très denses (3000 ind.m^{-2} ; Chassé et Glémarec, 1983). A. Ménesguen (1980) a également mesuré en baie Concarneau, jusqu'à 860 ind.0,1m^{-2}. Les observations par vidéo et

plongées (fig. 11g et h en Annexe 14) font apparaître un véritable tapis d'*Haploops*, à l'exception du centre des cratères presque intégralement dépourvus de ces colonies. Ces observations complètent les prélèvements à la benne qui permettent difficilement de juger à vue de la densité des colonies puisque le sédiment est renversé.

(3) Texture ridée (FA n°8 en Annexe 6.1) : Ce faciès est directement en contact avec le banc de maërl des Moutons. Il s'agit d'un sable moyen (23 %) à grossier (68%), ocre, bien trié et finement coquillier, mélangé à une petite fraction graveleuse (7% de petits gravillons). Les mégarides sont peu marquées au sonar comme sur le profil vidéo (RB2_Tr1) mais la granulométrie et le tri des échantillons remontés, sont la signature d'un sédiment mobile, facilement remobilisé par les agents hydrodynamiques.

Le faciès acoustique gris sombre

Il se limite pour l'essentiel à la terrasse entre Concarneau et Trévignon. Ces zones de très forte rétrodiffusion adoptent un faciès hétérogène, véritable "patchwork" sédimentaire à l'échelle du 1/5000ème, un faciès homogène localement ridé et un faciès présentant de belles mégarides plurimétriques

(1) Texture hétérogène (FA n°9 en Annexe 6.1) : Du point de vue sédimentaire, il s'apparente à ceux que la classification EUNIS décrit comme des "Mixed sediment". Il s'agit d'une vase sableuse à *Maldane* (29 % de vase) contaminée par des éléments détritiques de taille variée. Le SBL et les vidéos au bâti ponctuel montrent en effet qu'affleurent de ce "conglomérat" des lambeaux de "bedrock" sous la forme d'accumulations de blocs anguleux, de galets de cailloutis et de graviers recouverts d'une fine couche de vase. C'est un faciès que l'on retrouve dans le chenal d'accès au port de Concarneau et à la sortie de ce dernier.

(2) Texture homogène parfois ridée (FA n°10 en Annexe 6.1) : Il occupe l'essentiel de la terrasse à maërl au sud de Concarneau. Il s'agit en réalité d'un sédiment bimodal (VGrS) composé d'une vase à *Maldane* intensément draguée, sur laquelle des petites tâches de maërl assez épaisses subsistent, déconnectées des bancs de maërl principaux probablement au moment des plus fortes tempêtes. L'échantillon RB2_Bh25 illustre bien ce drapage par du maërl vivant sur cette épaisse couche de vase (Pinot, 1974).

(3) Texture ridée (FA n°11 en Annexe 6.1) : Ce faciès caractérise les nappes et bancs de maërl modelés de mégarides sur la terrasse entre Concarneau et Trévignon, sur le littoral de Beg Meil et enfin sur le banc des Moutons. Le maërl est un "gravier" biogène fortement rétrodiffusant au SBL. Ce faciès est décrit dans le détail au paragraphe 4.1.2.1a. Ces petites à moyennes dunes hydrauliques sont faiblement asymétriques comme le soulignent les profils vidéo et les quelques indications de direction de transport sédimentaire fournies localement, qui tendent à suggérer un déplacement probablement très modéré vers l'ENE.

Cette démarche a été reproduite pour les secteurs de Glénan (Annexes 8 et 11, FA en Annexe 6.2) et Quiberon (Annexes 9 et 12, FA en Annexe 6.3).

3.2.2.2 - L'option sonar à balayage latéral du Reson Seabat 8101 sur vedette Survex (Société Mesuris)

Les données acquises par le système équipant la vedette Survex de la société Mesuris sont numériques sans restitution papier. L'analyse des données sonar se fait donc exclusivement au travers des mosaïques acoustiques. La navigation nvi et les fichiers bathymétriques .mbb sont générés par le module *Tseabat* de Caraibes 2.5. Les fichiers imagerie imo sont issus du même module *Imisol* que pour le DF1000, seule l'option "choix du sonar" est selectionnée pour lire le format des XTF du Reson. Ils sont dans un premier temps importés avec la résolution brute (0,05m) puis dégradés par la suite dans le module *Corire* (0,3 m). Avant cette importation, il est nécessaire de réaliser une découpe des fichiers de navigation afin de limiter l'enregistrement au début et fin de chaque profil. Le fichier de

découpe dec ainsi obtenu, est intégré au module *Imisol* au moment de l'importation des XTF. C'est une opération longue et fastidieuse mais qui conditionne un bon rendu de la mosaïque finale.

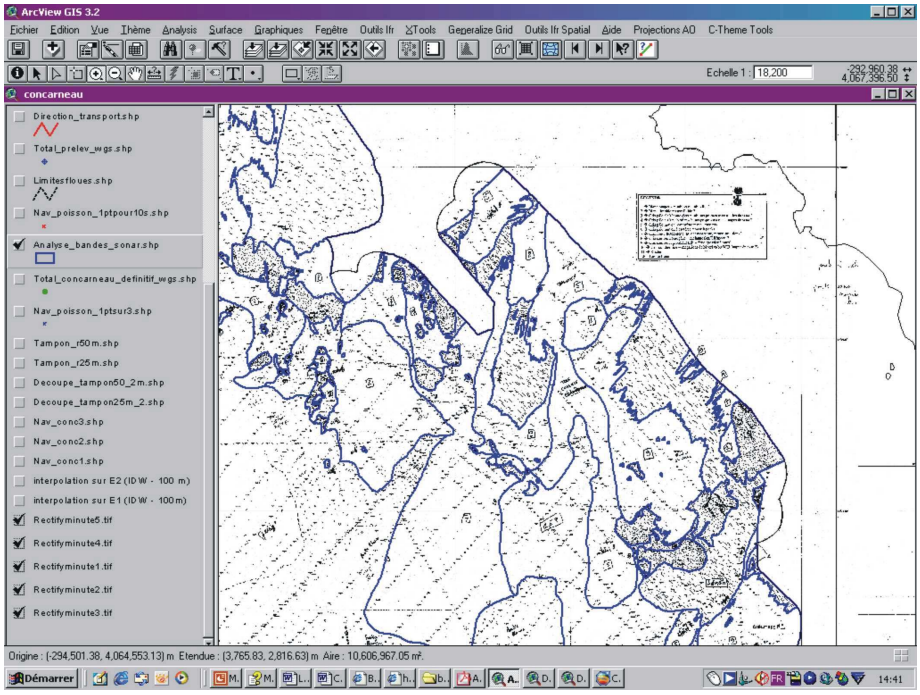


Figure 14 : Exemple d'un calque de dépouillement scanné et géoréférencé au Sud de Concarneau

Pour l'ensemble des mosaïques restituées pour la bande côtière entre Concarneau et la pointe de Trévignon, un pas terrain de 0,3 m (1400 dpi en sortie de *Cartim*) a été sélectionné de manière à se placer dans les mêmes conditions de résolution et d'interprétation que pour le DF1000 (*cf.* § 3.2.2.1b). La panoplie des faciès acoustiques (tab. 5) est moins large que pour le levé DF1000 qui concernait l'ensemble des fonds de la baie (Annexe 5). Ce qui s'explique :

- avant tout par une réduction des faciès sédimentaires à la côte (bancs de maërl, vase grossière, crème de vase, platier rocheux) propre à l'environnement géologique de cette baie (terrasse vaseuse plantée de hauts-fonds rocheux et de bancs de maërl ; Pinot, 1974),
- et, secondairement, par une discrimination moins forte des variations de coefficients de rétrodiffusion, du fait d'une fréquence d'émission du sonar plus élevée (240 kHz contre 100 kHz avec réduction de l'effet de volume).

Faciès acoustique	**Extrapolation sédimentaire sur la base de la calibration du DF1000**
Roche	Roche
Gris sombre ridé	Maërl pur
Gris sombre parfois ridé	Vase avec taches de maërl
Gris moyen homogène	?
Gris pâle homogène	Crème de vase
Gris pâle tacheté	Crème de vase + biocénoses ?

Tableau 5 : Liste des faciès acoustiques interprétés à partir des mosaïques sonar Reson

Mais globalement, les limites et les types de faciès acoustiques percus avec le DF1000 ont été prolongés sur la zone Reson. La figure 15 montrant la distribution des mégarides de maërl (pas de la mosaïque de 0,05 m) et les extraits de mosaïques en annexe 5 (pas des mosaïques de 0,3 m), illustrent les quelques faciès acoustiques présents sur ce secteur et le potentiel de cartographie de ce système. Seul le faciès gris moyen n'a pas été correctement détecté, probablement pour les raisons évoquées précédemment. Il reste à calibrer ces signatures de la même façon que pour le DF1000.

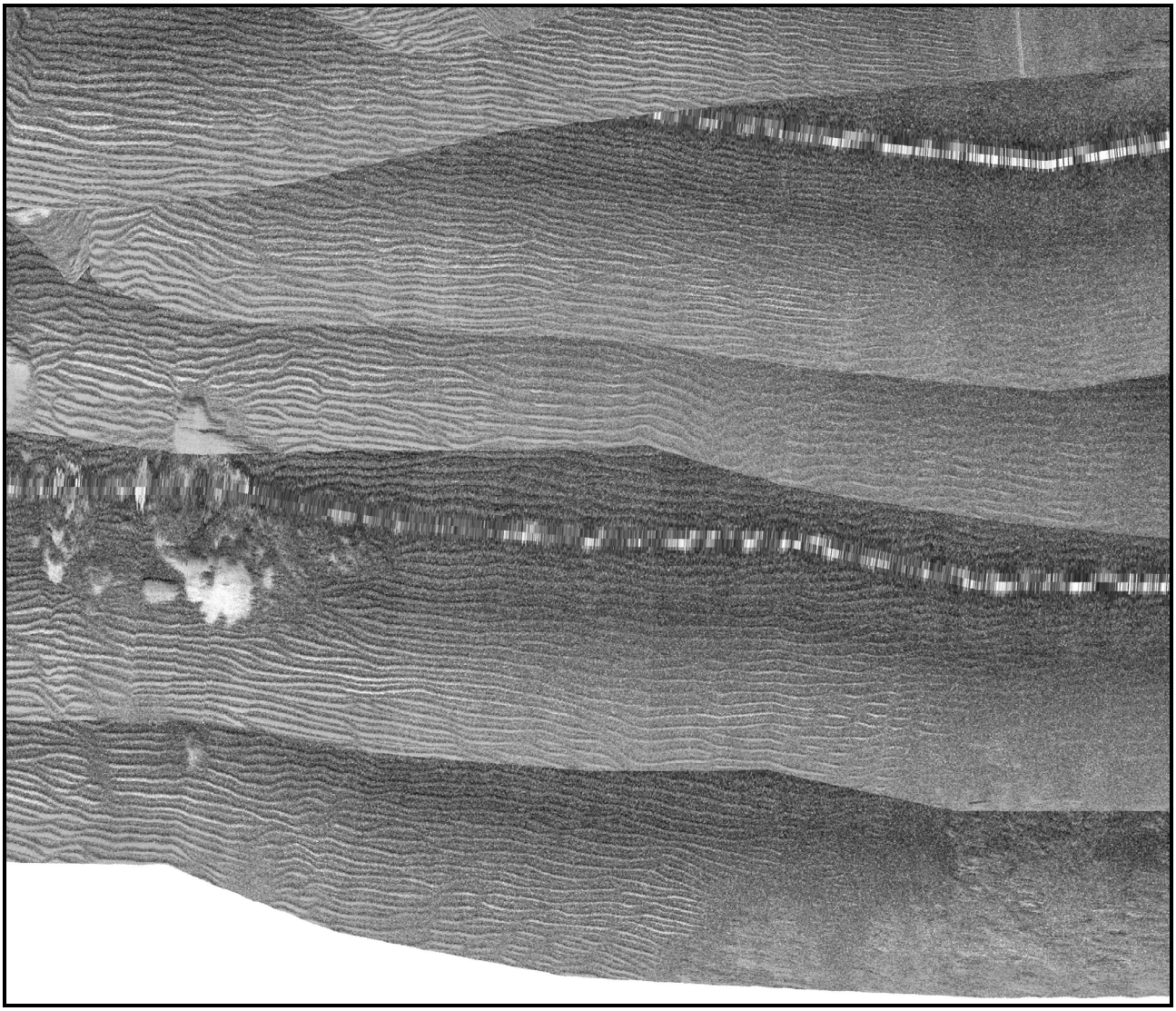
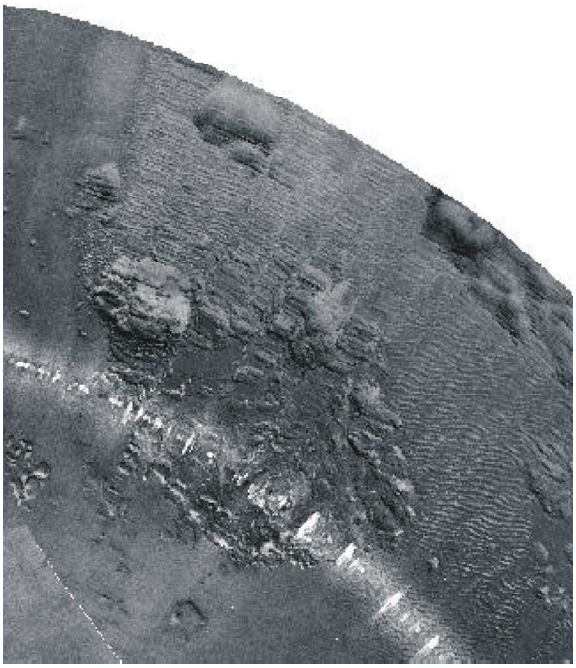


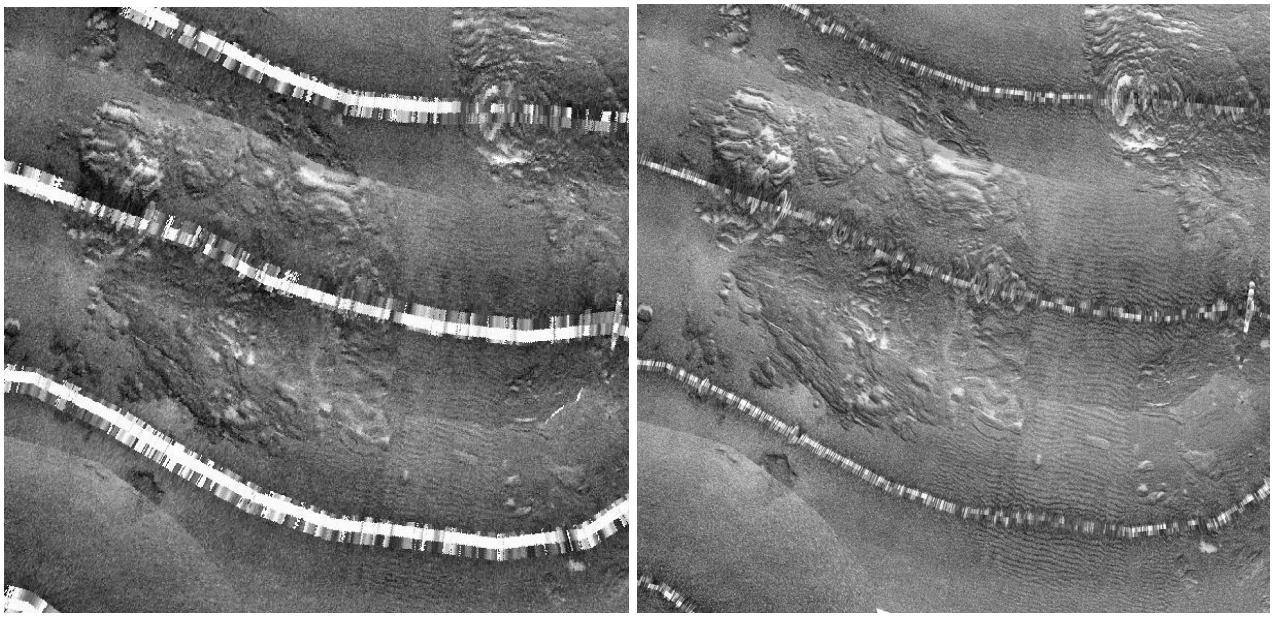
Figure 15 : Exemple d'un champs de mégarides de maërl (pas de la mosaïque 0,05 cm)

Sur les quelques zones de chevauchement avec l'imagerie du DF1000, l'exploitation des mosaïques du sonar de coque est plus difficile et les mégarides de maërl sont moins bien détectées, indépendamment de l'orientation des profils (*cf.* § 3.1.2.1e). La pérénité de ces figures sédimentaires n'est pas à remettre en cause dans cet environnement mais ce phénomène est directement lié au mode d'insonification du fond. Ceci s'explique par un effet de rasance du cône d'émission plus faible dans le cas du Reson, limitant les effets d'ombrage sur le fond. La morphologie des mégarides s'estompe donc, alors que les ombres des platiers rocheux se font plus discrètes (fig. 16a et 16b). L'effet s'atténue en mosaïquant avec un pas de 0,05 m (fig. 16c, 2400 dpi en sortie de *Cartim*) mais au détriment du temps de traitement prohibitoire et des volume des fichiers générés.

Un système acoustique comme le Reson Seabat 8111 (fig. 17) avec option sonar, fonctionnant à 100 kHz, devrait permettre de conserver les avantages d'un sonar de coque par très petit fond et de travailler dans la même gamme de fréquence que le DF1000 Edgetech.



a



b c

Figure 16 : Platier rocheux bordés de mégarides de maërl
(a : DF1000 à 0,3 m ; b et c : Reson à 0,3 m et 0,05 m)

3.2.2.3 – Le système RoxAnn

Les traitements des données RoxAnn peuvent être regroupés en 3 étapes :

(1) L'exploration des données et des traitements préliminaires qui conduisent à épurer les fichiers bruts et à préparer l'étape d'analyse ;
(2) L'interpolation des données qui conduit, à partir d'un semis de point RoxAnn, à une couverture continue (Annexe 13) ;
(3) La classification des données qui conduit, à partir de classes acoustiques, à des types de substrats ou d'habitats caractérisés par leurs propriétés sédimentaires et/ou biologiques.

Figure 17 : Sondeur Reson 8111 (© Photos Reson)

L'exploration des données par des traitements préliminaires a pour but :

- de conserver les données qui ont une qualité suffisante et supprimer les données douteuses ;
- d'explorer le jeu de données et fixer les variables de dépendance ;
- d'établir un modèle de corrélation spatiale.

Dans le cadre de cette étude, seules les deux première étapes ont été appliquées. Les données brutes, épurées des valeurs aberrantes, montrent, indépendamment et dans leur ensemble, une bonne cohérence. Le chenal d'accès au port de Concarneau a été utilisé comme profil de contrôle de l'acquisition RoxAnn pendant toute la durée de levé sur cette zone. Les données du 4 et 6/03/2003 sur Concarneau sont particulièrement parasitées. Des cartes d'interpolation sur les deux paramètres, ressortent quelques premiers éléments de la répartition des principales enveloppes sédimentaires :

Baie de Concarneau (Annexe 13) :

- *Faciès peu rugueux (< 0,468) et peu dur (< 0,353)* : il correspond aux fonds envasés du centre de la baie jusqu'à l'entrée de la baie de la Forêt, limités au mélange vase et sable très fin homogène et, dans la partie SE, aux vases à pockmarks qui se différencient par des valeurs de E2 plus faibles. Il occupe également très localement, des petites fosses à la côte, entre la pointe de la Jument et Concarneau, remplies de crème de vase.
- *Faciès peu rugueux (< 0,468) et moyennement dur (< 0,491)* : il s'agit des fonds de sable très fin vaseux à sable fin vaseux occupant la bordure occidentale de la baie, en transition avec les faciès grossiers sablo-organogènes. Il englobe également la couverture de sable fin (E1 plus élevé) en écharpe autour du banc de maërl des Moutons.
- *Faciès moyennement rugueux (< 0,717) et dur (< 0,63)* : il représente les vases grossières devant l'entrée du chenal du port de Concarneau et la terrase à maërl, entre Trévignon et la baie de la Forêt, caractérisée par une alternance de vase à maldanes (localement recouverte d'une fine couche de maërl) et de bancs de maërl. Il constitue également la nappe de sable grossier modelée de mégarides au contact du banc de maërl des Moutons.
- *Faciès rugueux (> 0,717) et très dur (> 0,63)* : il est localisé sur quelques bancs de maërl et surtout sur les zones de roche (E2 plus élevé).

Archipel de Glénan (Annexe 13) :

- *Faciès peu rugueux (< 0,394) et peu dur (< 0,326)* : il se limite à la couverture de vase et sable fin "percée" de cratères au NE, en bordure du chenal qui mène à la baie de Concarneau.
- *Faciès peu rugueux (< 0,394) et moyennement dur (< 0,464)* : il correspond à la couverture de sable moyen ridé au SE de Penfret et au sable fin vaseux en transition avec le maërl envasé au nord des Pierres Noires.

- *Faciès moyennement rugueux (< 0,735) et dur (< 0,601)* : il représente la bande de gravier organogène (maërl) envasé et l'essentiel de la couverture sédimentaire grossière de la moitié occidentale de l'archipel (mégarides de sable grossier et de gravier sableux). Les valeurs plus élevées de E1 délimitent grossièrement le banc de maërl de Saint-Nicolas.
- *Faciès moyennement rugueux (< 0,735) et très dur (> 0,601)* : il caractérise les fonds rocheux, les zones à blocs et des parties du grand champs de mégarides sablo-graveleuses qui étaient apparues très homogènes au SBL.
- *Faciès rugueux (> 0,735) et très dur (> 0,601)* : il se limite à quelques zones de roche et à la souille résultant de l'exploitation du banc de maërl au nord-ouest de Penfret (FA n°9 en Annexe 6.2).

<u>Baie de Quiberon</u> (Annexe 13) :
- *Faciès peu rugueux (< 0,421) et peu dur (< 0,354)* : il correspond aux vase et sable très fin tachetés au large de Beg Rohu et à l'extrémité NE du secteur d'étude.
- *Faciès peu rugueux (< 0,421) et moyennement dur (< 0,423)* : il se limite pour partie à la couverture de sable très fin vaseux chalutée.
- *Faciès peu rugueux (< 0,421) et dur (< 0,559)* : il s'agit des sédiments de sable fin vaseux et de leur prolongement vers le sud, sous la forme d'un drapage de sable fin sur le sommet des deux bancs à l'entrée de la baie.
- *Faciès moyennement rugueux (< 0,523) et moyennement dur (< 0,423)* : il regroupe en partie le fond de baie à sable très fin vaseux et les vases sableuses à crépidules au NE.
- *Faciès moyennement rugueux (< 0,523) et dur (< 0,559)* : il délimite les flancs des bancs à l'entrée de la baie, recouverts de sable fin et de sable moyen modelé de grosses mégarides
- *Faciès rugueux (> 0,523) et très dur (> 0,559)* : il se localise dans les fosses qui séparent les grands bancs de sable, soit sous la forme d'un gravier parfois envasé dans lequel la benne remonte peu de sédiment, soit sous la forme de mégarides de graviers sableux (E2 plus faible) sur le flanc Est du banc de Quiberon.

3.2.2.4 – Les sondeurs multifaisceaux petits fonds : exemple de l'EM1000 de la société Simrad et du Seabat 8101 de la société Reson

Les traitements des données numériques des SMF se réalisent également avec le logiciel Caraibes 2.5. Ils se décomposent en deux étapes :

(1) Le traitement des données de bathymétrie qui comporte :

- un contrôle, une validation et un filtrage des données brutes. Les données brutes peuvent être dégradées, soit par la présence de sondes aberrantes, soit par des bruits de mesure. Les bruits de mesure sont généralement liés aux paramètres d'environnement que sont en particulier l'attitude, le positionnement du navire et la mesure de la célérité du son dans l'eau ;
- la constitution du modèle numérique de terrain. La qualité du modèle numérique de terrain est directement liée à la qualité des données brutes et aux opérations d'élimination d'erreurs appliquées à celles-ci, ainsi qu'au choix du pas de grille qui permet d'adapter le modèle à l'espacement des sondes et à l'échelle de la carte ;
- un lissage des modèles numériques de terrain. Des opérations sont appliquées directement au modèle numérique de terrain pour éliminer certains artéfacts liés aux données brutes et qui n'ont pu être corrigés antérieurement.

(2) Le traitement des données de réflectivité qui passe par :

- une modélisation des cycles d'acquisition des données pour le calcul des courbes de correction des secteurs angulaires d'émission du signal. Cette opération permet d'homogénéiser les données des cinq secteurs angulaires du sondeur. Cette modélisation est

calculée sur des séries de cycles correspondant à une réponse acoustique homogène sur le fond ;

- la réalisation d'une mosaïque d'images acoustiques. Les pixels d'imagerie acoustique sont positionnés à partir des données de navigation, de bathymétrie et de célérité. Les courbes de correction des secteurs angulaires sont appliquées en même temps que le mosaïquage des données ;
- une interpolation des mosaïques. La taille du pixel est choisie en fonction de l'échelle cartographique. Aux échelles habituelles de traitement, cette taille est inférieure à l'espacement entre deux cycles consécutifs d'acquisition sondeur. Dans ce cas, une interpolation est nécessaire : elle est faite à l'aide d'un algorithme d'interpolation qui tient compte du voisinage ;
- un rehaussement de contraste. La visualisation des mosaïques d'images acoustiques se fait classiquement en niveaux de gris : l'application d'un rehaussement de contraste permet d'utiliser au mieux la palette de gris en fonction de l'histogramme des valeurs des pixels, pour une meilleure lisibilité des images obtenues.

Ils aboutissent :

- au calcul d'un modèle numérique de terrain, résultant des mesures de bathymétrie. Un modèle numérique de terrain est une grille régulière de valeurs bathymétriques interpolées à partir des données brutes du voisinage. Il peut être importé dans un SIG pour être interpolé ou créer des TIN (fig. 18, Triangulated Irregular Network) ;
- à la constitution d'une mosaïque d'images acoustiques résultant de l'exploitation de la réflectivité du signal acoustique sur le fond. Chacun des pixels de la mosaïque correspond à une surface élémentaire sur le fond, associée à un niveau de réflectivité exprimé en décibels.

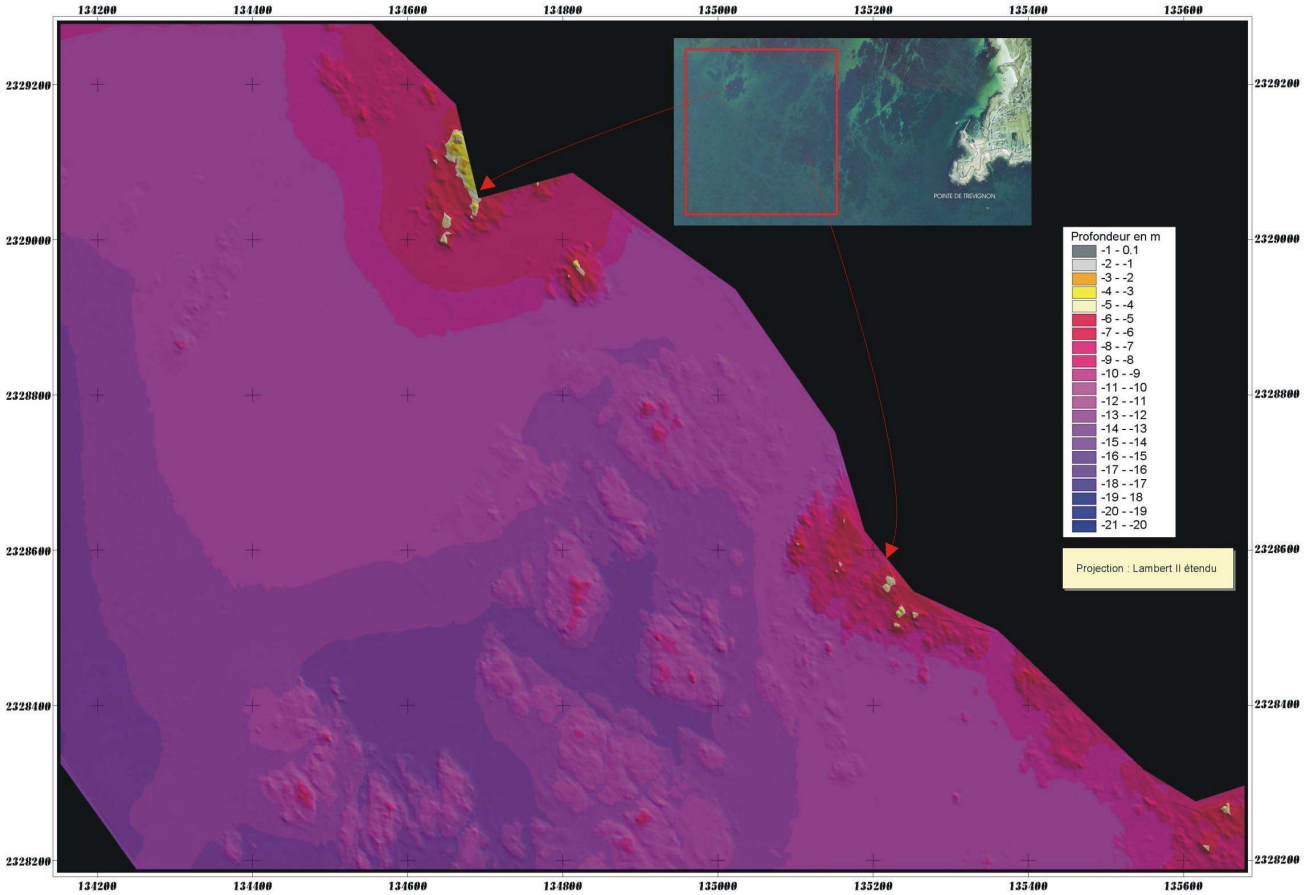


Figure 18 : Carte bathymétrique résultant de l'interpolation du MNT à 5 m produit par le Reson Seabat 8101

3.2.3 - Exemple de données produites sur la baie de Concarneau

La caractérisation des types de fonds à partir des données sonar aboutit, pour chaque secteur, à la réalisation de maquettes intermédiaires qui seront complétées et/ou modifiées par l'analyse faunistique des échantillons prélevés lors de la deuxième campagne, en octobre 2003 (étude en cours). La calibration des données acoustiques est la phase la plus délicate qui demande d'intégrer et de compiler l'ensemble des sources d'informations sur le secteur d'étude :

- la description et la photo des prélèvements à bord (An-7, 8 et 9 en Annexe 14),
- l'analyse granulométrique des échantillons retenus (Annexes 2 et 3),
- l'analyse des profils vidéos réalisés pour calibrer les faciès et les signatures spécifiques,
- les données bibliographiques.

La maquette morphosédimentaire ainsi élaborée (Annexe 10), se compose des principaux fichiers au format shape suivants (format ERSI) (tab. 6) :

- <u>une "couche", concernant la description sédimentaire, de chaque polygone</u> :
    - le numéro de la fiche acoustique correspondante (Annexe 6),
    - une observation dans le cas d'un faciès particulier ou d'une opération à programmer,
    - le type de faciès acoustique propre au DF1000,
    - le type de faciès acoustique propre au Survex,
    - le type de sédiment selon la classification retenue (Annexe 1);

Shape	Fiche_acou	Observatio	Type_faci	Survex	Type_sed
Polygon	1	crème de vase probablement mobile	blanc homogène		V
Polygon	10	Maërl dispersé sur une vase sableuse compacte à maldanes	gris sombre parfois ridé		VGr
Polygon	10	Maërl dispersé sur une vase sableuse compacte à maldanes	gris sombre parfois ridé		VGr
Polygon	0		roche		roche
Polygon	11		gris sombre ridé		Maerl
Polygon	10	Maërl dispersé sur une vase sableuse compacte à maldanes	gris sombre parfois ridé		VGr
Polygon	11		gris sombre ridé		Maerl

Tableau 6 : <u>Extrait de la table attributaire concarneau_sedim.shp</u>

- une "couche" morphodynamique (concarneau_morpho.shp) avec, pour chacun des arcs, la nature de la figure sédimentaire (crête de mégarides, crêtes de grandes dunes hydrauliques, sommet de banc…) ;
- une "couche" ponctuelle (concarneau_info.shp) concernant les informations quantitatives sur les structures cartographiées (amplitude des grandes dunes, longueur d'onde…) ;
- une "couche" se rapportant à la dynamique sédimentaire sur le secteur (concarneau_dyna.shp) qui fournit, sur la base de l'interprétation des figures sédimentaires, la direction et le sens potentiel de transport sédimentaire sur le fond et qui comprend, pour chaque segment, une description de la nature de l'objet (mégarides par exemple) ;
- une "couche" regroupant divers polygones (concarneau_diverspoly.shp) comme les limites d'une zone d'extraction de granulats, la présence d'épave et d'un faciès trop ponctuel pour constituer une catégorie supplémentaire dans la distribution des faciès sédimentaires (pockmark isolé, zone de blocs…).

La démarche a été identique pour les deux autres secteurs levés en 2003 (Annexe 11 : Archipel de Glénan ; Annexe 12 : baie de Quiberon). Sur la base de ces cartes, complétées par l'analyse faunistique des échantillons biologiques prélevés lors de la deuxième campagne, des cartes d'habitats marins seront finalisées à l'échelle du 1/25 000ème. Il est cependant possible pour des secteurs spécifiques, d'envisager une restitution à plus grande échelle (1/10000ème voire 1/5000ème) comme pour certaines zones très morcelées (Glénan, Bréhat,…). Du point de vue

format, la diffusion des données se fait principalement en format numérique géoréférencé, via le site Internet Rebent (www.ifremer.fr/rebent/index2.htm), sur CD-Rom ou DVD.

4 – Discussion

4.1 – Le DF1000 : Pièce maîtresse dans la stratégie Rebent

4.1.1 – L'ambiguïté des réponses acoustiques

Pour la partie subtidale, le DF1000 constitue le pilier des engins mis en œuvre pour la cartographie des habitats. La principale difficulté demeure dans l'interprétation biologique et/ou sédimentaire des signatures acoustiques détectées sur chaque secteur. Il n'y a pas de règles bien établies, ni de relations linéaires entre la granulométrie d'un sédiment et son coefficient de rétrodiffusion, exprimé en niveaux de gris, ce qui rend plus difficile l'interprétation des sonogrammes et, par voie de conséquence, un traitement automatique de l'analyse des mosaïques acoustiques (tab. 7). En baie de Concarneau, une vase graveleuse assez compacte aura la même réponse qu'un gravier hétérogène à Quiberon.
Ce qui est vrai pour le sonar à balayage latéral DF1000, l'est tout autant pour les autres systèmes fonctionnant à moyennes fréquences (spectre des réponses acoustiques plus large). Les niveaux de gris sont le reflet, à une fréquence donnée, de l'intégration des propriétés physiques de la surface de la cellule élémentaire de résolution (rugosité, granulométrie, hétérogénéité) et des premiers centimètres sous cette surface (bioturbation, densité, teneur en eau, multicouches). Les effets de surface et de volume se conjuguent pour produire de multiples combinaisons que l'on résume généralement à un nombre limité de faciès morphosédimentaires, faute d'une calibration exhaustive (limites de l'échantillonnage à la benne). Il est certain qu'un même fond sableux, homogène et dépourvu d'une macrorugosité importante, répondra différemment avec l'augmentation de la teneur en vase dans ce sédiment (Ehrhold, 1999). La granulométrie ne suffit pas, à elle seule, pour expliquer la panoplie des faciès détectés.

	Blanc	Gris pâle	Gris moyen	Gris sombre
Gravier				
Gravier-sable grossier				
Gravier vaseux				
Sable grossier graveleux				
Sable grossier				
Sable moyen				
Sable fin				
Sable fin envasé				
Sable très fin envasé				
Vase graveleuse				28% en vase
Vase - sable fin			46% en vase	
Vase - sable très fin	45 à 56% en vase	35 à 42% en vase	29 à 73% en vase	
Vase	83% en vase			

Tableau 7 : Correspondance entre le type de sédiment et la signature acoustique observée sur les 3 secteurs Rebent explorés en 2003

Pour appréhender la complexité des trames acoustiques, la qualité de l'interprétation sera fonction de l'échelle de dépouillement et de l'effort de calibration au moment du levé (prélèvements à la benne, vidéo sous-marine, plongeur sous-marin, micro-carottage). La qualification des niveaux de gris est *a fortiori* subjective, puisqu'elle dépend de l'expérience du scientifique et de l'échelle de restitution. Le faciès gris sombre hétérogène en baie de Concarneau (FA n°9 en Annexe 6.1) constitue à l'échelle du 1/5000ème, un patchwork de différentes nuances, sans organisation particulière, correspondant à un fond de vase sableuse et localement caillouteuse.

La description des sonogrammes est basée sur deux paramètres : la nuance de teinte et la texture de l'image. Le tableau 8 résume l'ensemble des couples identifiés sur les 3 secteurs. La multiplication des

textures s'explique par l'action des engins de pêche sur le fond (traces de chalutage, de dragage…), par l'hydrodynamisme dans les zones à fort courant (aspect ridé sous la forme de petites dunes hydrauliques), ou par la présence de structures aléatoires (cratères, biocénoses).

	Homogène	Ridé	Texturé	Tacheté (biocénoses ?)
Blanc				
Gris pâle				
Gris moyen				
Gris sombre				
Roche				

Tableau 8 : Ensemble des signatures acoustiques obtenues sur les 3 secteurs explorés en Bretagne sud

Exemple des mélanges sédimentaires où la fraction vaseuse est importante

Une vase fluide telle qu'observée dans la partie est de la baie de Concarneau, homogène sur plusieurs centimètres et dépourvue d'espèces de macrofaune en très forte densité, se caractérise par un faciès blanc limpide. Or, la rétrodiffusion des mélanges vaseux au sens stricte de l'analyse granulométrique (> 25 % de particules inférieures à 50 µm) augmente très significativement, allant jusqu'à un gris sombre, c'est à dire une réponse attendue pour un sédiment grossier graveleux. Cette ambiguïté a lieu lorsque :

(1) la concentration dans le sédiment en maldanes et haploops, qui modifient les propriétés rhéologiques de la couche sédimentaire à l'interface, la rendant plus compacte (densité plus élevée) et hétérogène, entraîne un changement de son comportement à la rétrodiffusion (gris moyen à sombre) avec une variation de :
   - l'effet de volume par la densité des tubes pluricentimétriques annelés et grossiers de *Maldane glebifex*,
   - l'effet de surface par la densité des colonies d'haploops qui peuvent recouvrir jusqu'à 100% de la surface du fond.

(2) les taches de maërl viennent "polluer" superficiellement les fonds vaseux compacts à maldanes par le jeu de l'hydrodynamisme. La réponse est d'un gris sombre parfois ridé, liée à une variation de :
   - l'effet de volume par la densité des tubes pluricentimétriques annelés et grossiers de *Maldane glebifex*,
   - l'effet de surface par la dispersion des brins de maërl de taille comparable à celle de gros graviers.

Les variations de réponses s'expliquent également dans le cas de fines couches sédimentaires empilées les unes sur les autres (notion de tache blanche). Ce phénomène est répandu avec des sonars de plus basses fréquences utilisés pour cartographier les deltas sous-marins (Gardner et *al*., 1991). Même si, à 100 kHz, le volume de rétrodiffusion n'intéresse seulement que les 10 à 20 premiers centimètres, la présence d'une fine couche en surface de sable fin propre prélevée à la benne shipeck sur une vase sableuse prélevée au même endroit à la benne Hamon produit une réponse moyenne qui n'est pas représentative du milieu sédimentaire.

4.1.2 – Détection des biocénoses par méthodes géophysiques

4.1.2.1 – Les espèces "stars" en acoustique

Deux biocénoses, à maërl et à *Crepidula fornicata,* ont répondu avec certitude à l'acoustique sous-marine, confortant les attentes et rejoignant en cela les résultats de travaux comparables (*cf.* § 2) :

a) Les biocénoses de maërl

Les biocénoses de maërl ont été détectées directement par le sonar à balayage latéral (DF1000 ou Reson) aussi bien sur Concarneau (Annexe 7 et FA n°11 en Annexe 6.1) que sur le pourtour de l'archipel de Glénan. (Annexe 8 et zone3 sur FA n°10 en Annexe 6.2). Les nombreuses validations effectuées en mars et octobre 2003 montrent que cette signature correspond à un gisement organogène épais, en équilibre avec les conditions hydrodynamiques, modelé de petites et moyennes dunes hydrauliques de quelques mètres de longueur d'onde (1 à 5 m) et décimètres d'amplitude. La surface des bancs est extrêmement variable, de quelques m^2 à plusieurs km^2. Ils se développent à Concarneau, soit sur un substrat envasé, généralement accrochés aux haut-fonds rocheux entre Trévignon et Beg Meil, soit sur des fonds grossiers à l'Est des Moutons. Les profils sismiques suggèrent que ces bancs auraient, pour les plus importants d'entre eux, une épaisseur de 7 à 10 m (Pinot, 1974).

Sur le pourtour Nord de Glénan, entre les îles Saint-Nicolas et Penfret, la nappe de maërl pure, modelée de mégarides métriques, est limitée à 3 unités morphosédimentaires réduites de 0,9, 0,2 et 0,03 km^2 de surface environ (Annexe 8). Elles se prolongent, mais seulement en partie, dans la zone non prospectée par le DF1000, comme nous avons pu le constater avec l'imagerie du Reson lors du levé avec la vedette Survex en octobre 2003. Tous les prélèvements effectués à la benne à l'extérieur de ces unités (FA n°9 en Annexe 6.2) remontent un sédiment grossier hétérogène, mal trié, dans lequel le maërl, essentiellement mort, est mélangé à des mottes de vase épaisse. Quoiqu'il en soit, ces observations abondent dans le sens d'un net recul de la biocénose typique de maërl depuis 30 ans (Grall, 2003), lié aux activités d'extraction sur le site.

L'approche méthodologique Rebent permet donc de cartographier précisément les bancs et les nappes de maërl (fig. 6, 13, 15 et 19) et de suivre leur évolution dans le temps.
Lorsque que le maërl est dispersé latéralement par les agents hydrodynamiques (fortes houles et courants de marée de grandes vives-eaux), il vient draper de façon discontinue, un sédiment vaseux dans lequel sa signature acoustique se dissipe (FA n°10 en Annexe 6.1 et n°9 en Annexe 6.2).

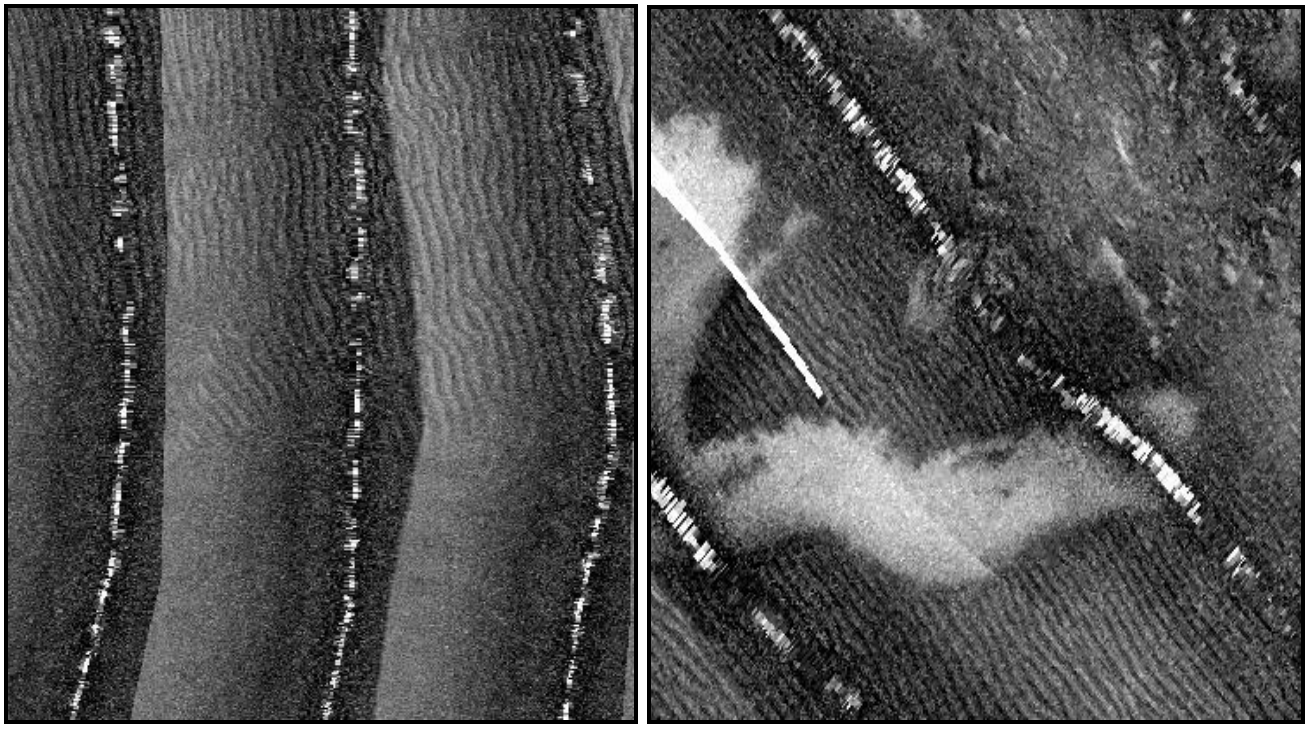


Figure 19 : Nappes ridées de maërl extraites des mosaïques sonar du Reson 8101 en baie de Concarneau

Ce sédiment marin, constitué d'algues rouge calcaires (Corallinacées) arbusculaires vivant librement sur les fonds meubles infralittoraux (fig. 20), a très largement été étudié pour ses valeurs écologiques et économiques ;

- Les bancs de maërl allient d'une part les caractères d'un substrat dur, où la possibilité de fixation est importante, et d'autre part les possibilités de vie endogée à différentes profondeurs, en raison de sa complexité structurale (grande porosité impliquant une forte rétrodiffusion). Ce qui explique leur exceptionnelle diversité (plus de 50 espèces pour 0,1m^2) (Cabioch, 1968 ; 1971 ; Cabioch *in* Dauvin, 1997).
- Ce matériel organogène participe à la fertilisation des sols acides, au retraitement des eaux usées, comme complément alimentaire et matière première dans les produits pharmaceutiques et cosmétiques (Grall, 2002). L'extraction au large des côtes bretonnes est limitée à 500 000 T/an par des quotas. Le gisement au nord de l'archipel de Glénan est très largement exploité industriellement depuis 1970. Les récentes études (Grall, 2003) y observent de grands changements dans la composition des peuplements macrobenthiques.

Figure 20 : Photo en plongée d'un gisement de maërl vivant autour des îles Orkney
(© Malcom Thomson, 2000)

b) Les biocénoses à crépidules (fig. 21)

Elles n'ont été observées uniquement qu'en baie de Quiberon, renvoyant avec certitude une signature de type gris moyen rubané (Annexe 9 et FA n°6 en Annexe 6.3). La zone recensée couvre environ 5 km^2. Elle a été recoupée à plusieurs reprises par des traits vidéos qui montrent l'alternance d'accumulations de crépidules, essentiellement mortes, sur le fond, sous la forme de bandes métriques espacées les unes des autres par une vase sableuse. Cette signature acoustique, qui donne un aspect "labouré" sur l'enregistrement, naît du fort contraste entre les bandes rugueuses à crépidules et le fond plat relativement homogène. Deux digitations s'allongent en direction du SW sur 0,5 et 3 km.

En considérant que les agents hydrodynamiques soient les seuls responsables de cette distribution sur le fond, la région source se situe au NE, à proximité de la zone de dépôt des crépidules par les ostréiculteurs (*com. pers.* M. Blanchard). Elle est caractérisée par un faciès acoustique gris pâle tacheté (petites taches sombres en forte densité) en bordure des parcs à huîtres sur environ 0,3 km^2 (FA n°4 en Annexe 6.3). Elle déborde de la zone insonifiée, notamment vers le SE. La seule observation réalisée dans cette unité (RB2_Bh3) décrit une vase collante mélangée à quelques crépidules et ne suffit pas pour affirmer que ces taches sont bien le résultat d'agrégats de crépidules sur le fond.

Figure 21 : Exemple d'un fond colonisé par les crépidules en baie de Saint-Brieuc (© ifremer)

4.1.2.2 – Les signatures à conforter

Sur les trois secteurs couverts en 2003, et à plusieurs reprises, le sonar à balayage latéral a détecté plusieurs échos singuliers, souvent limités dans l'espace et parfois dans le temps. Ils se traduisent généralement par la présence de taches métriques à plurimétriques, plus ou moins circulaires, souvent peu organisées et parfois denses sur des fonds sédimentaires homogènes. Leur distribution et leur aspect leur enlèvent toute origine morphosédimentaire ou hydrosédimentaire. La difficulté consiste donc à détecter ces signatures au moment du levé géophysique et d'être capable de les qualifier (observations) avant de quitter la zone, ou tout du moins rapidement après la fin de campagne. Les exemples suivants illustrent le fort potentiel d'un système comme le SBL DF1000 dans la délimitation précise de peuplements macrobenthiques et dans le suivi de leur évolution, à condition d'appliquer des règles strictes de calibration.

a) Interférences par une couverture algale dense ?

L'une des interrogations qui se posait au moment de la première campagne géophysique, en mars 2003, était de savoir si un système comme le sonar à balayage latéral ou RoxAnn pouvait détecter la présence d'une couverture algale dense. Il apparaît qu'à 100 kHz avec le DF1000 et à une seule exception, les substrats rocheux des trois secteurs balayés présentent un faciès dépourvu de toute ambiguïté montrant la fracturation et la lithologie des roches en place. Seule une petite zone à un demi-mile à l'est de Port-Haliguen possède une réponse acoustique particulière avec un effet de "strie", et dont l'origine n'est pas liée à ses caractéristiques géologiques (fig. 22 et Annexe 12).

Le profil vidéo effectué au bâti ponctuel (RB2_Bat5) a traversé une partie de cette zone. Les zones sombres striées correspondent en réalité à de petits platiers rocheux discontinus et recouverts presque dans leur intégralité de la même algue (masse noire sur la fig. 23) qui resterait à déterminer.

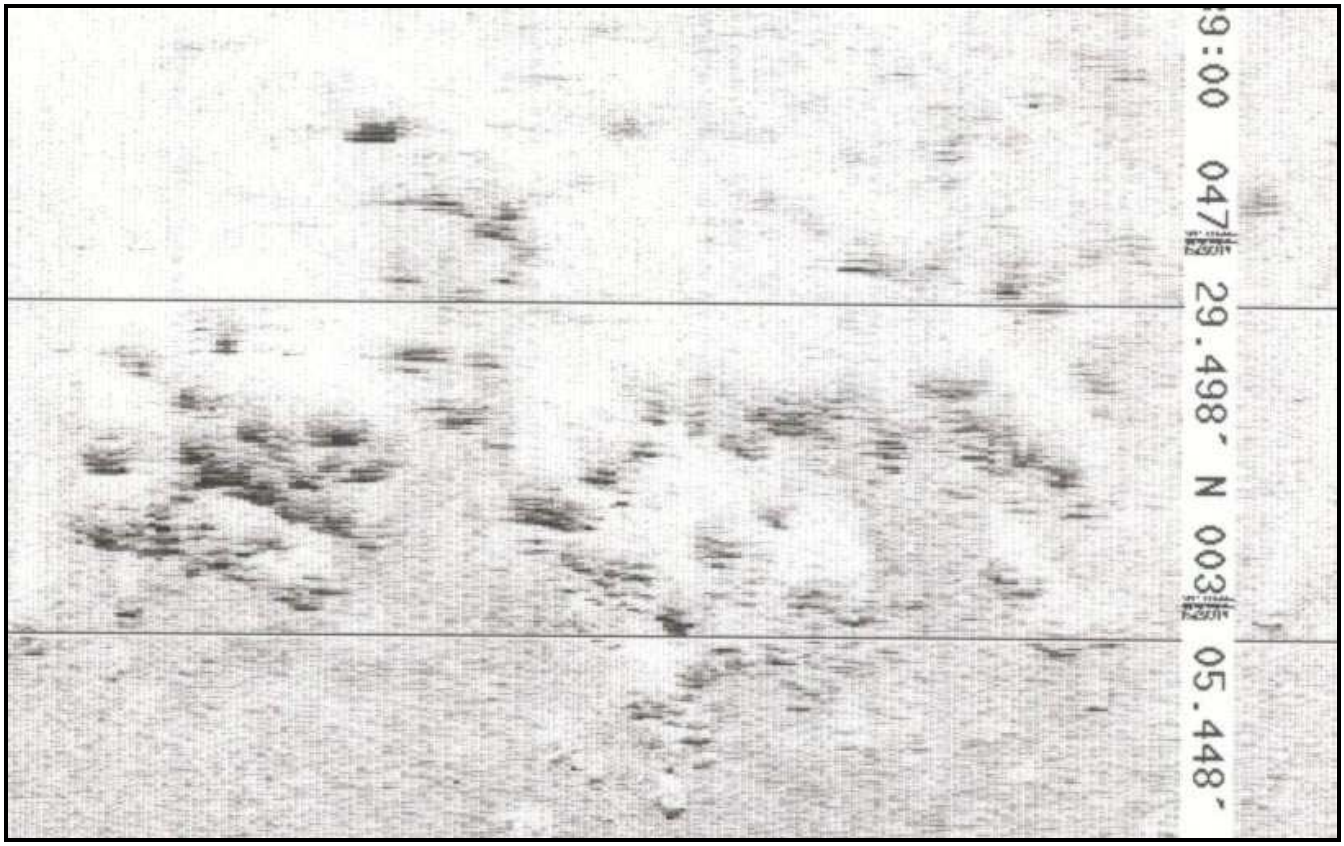


Figure 22 : Platiers rocheux disséminés au large de Port Haliguen

Figure 23 : Photo extraite d'un profil à la vidéo sous-marine au large de Port-Haliguen

b) Faciès acoustique tacheté à *Maldane glebifex* ?

Sur le secteur de Concarneau (FA n°5 en Annexe 6.1), ce faciès se rencontre dans la partie centrale de la baie et au droit de Beg Meil sur deux larges zones, respectivement de 2,5 et 1,7 km^2, sous la forme d'une alternance de tâches sombres longilignes orientées NW-SE d'une dizaine à une vingtaine de mètres de large, pouvant localement s'anastomoser (fig. 24). Les prélèvements effectués lors de la campagne géophysique dans ces deux zones montrent que l'on remonte soit :

(1) en faible quantité, un sable très fin avec quelques galets de vase (fig. 24a),
(2) soit un sable très fin propre mélangé à une motte de vase compacte avec quelques maldanes (fig. 24b),

(3) soit une vase compacte à forte densité de maldanes (fig. 24c).

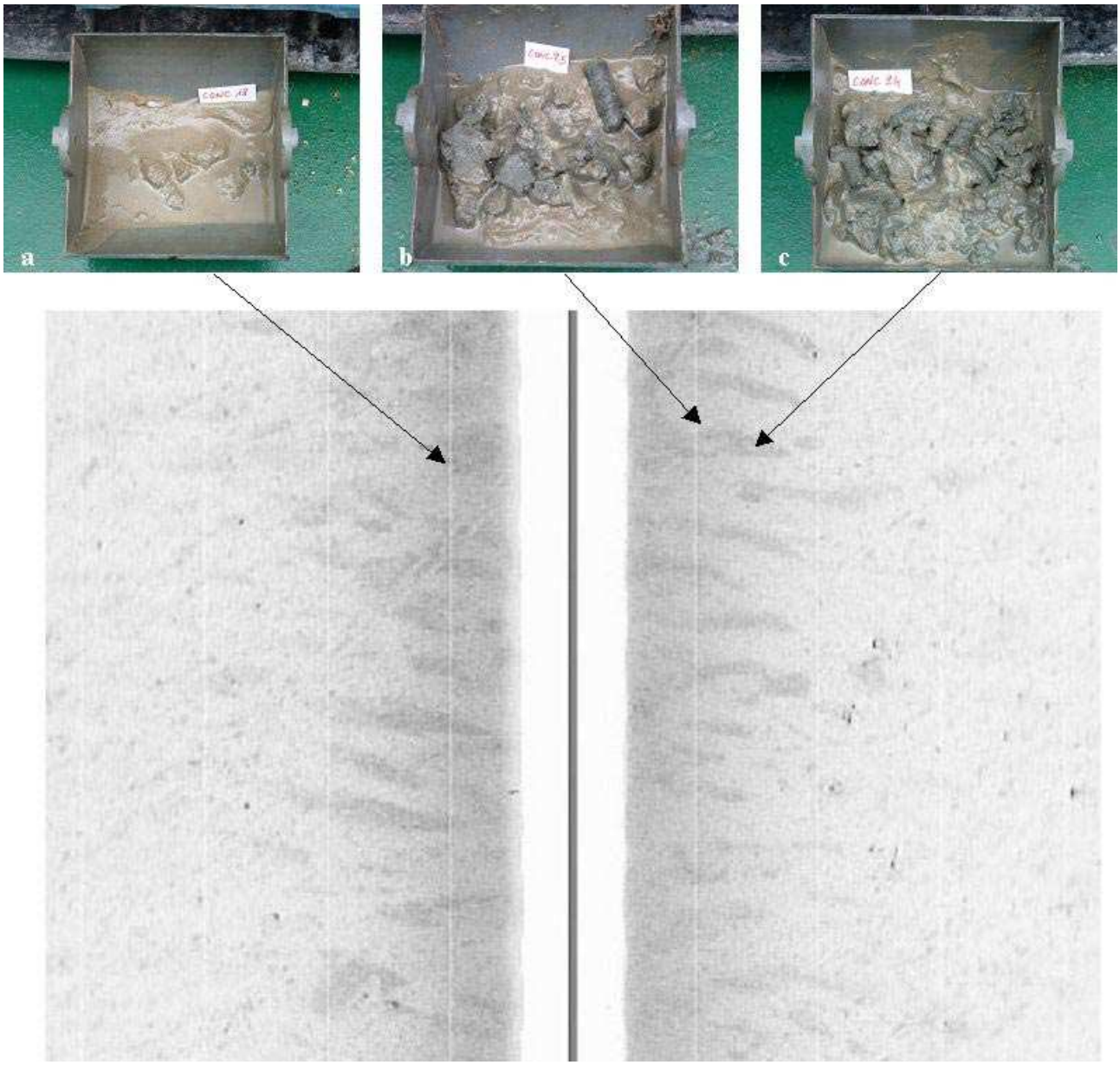


Figure 24 : Extrait d'un sonogramme montrant l'alternance de taches longilignes sombres avec un sédiment fin homogène (échelle : 25 m entre deux lignes verticales)

Sur le secteur de Quiberon (FA n°7 en Annexe 6.3), il se limite à la partie NW de la zone levée au droit de Beg Rohu, à la limite des concessions de parcs (Annexe 9). Les taches sont plus petites et plus denses et ne semblent pas s'organiser en bandes étirées selon la même direction que dans la baie de Concarneau. Les prélèvements effectués ne montrent pas de gradient mais un sédiment homogène vaso-sableux à forte densité de maldanes.

Les vases sableuses de la mer d'Iroise et de Bretagne sud sont propices à l'installation de populations du polychète *Maldane glebifex* à très large tube (Dauvin, 1997 ; Hily et Glémarec, 1999). La distribution de cette espèce sur le fond est mal connue. Sa concentration en tubes annelés dans les 15 premiers centimètres du sédiment modifie ses propriétés physiques (fig. 25). Le contraste de rétrodiffusion s'explique par la perturbation de l'effet de volume au sein des plus fortes colonies, alors que l'effet de surface reste secondaire. A. Ménesguen (1980) a mesuré jusqu'à 25 ind.0,1m^{-2} dans ce secteur. En effet, les tubes ne sortent que de 1 à 2 centimètres de la surface et les conditions d'observations de ces fonds à la troïka, aussi bien sur Concarneau (RB2_Tr4) que sur Quiberon (RB2_Tr1), n'ont pas permis de constater en surface de telles concentrations, en revanche visibles, au bâti ponctuel lorsque la caméra est très proche du fond.

Figure 25 : Exemple d'un tube de *Maldane glebifex*

c) Faciès acoustique "boursouflé" à *Lanice conchilega* ?

Ce faciès a été observé en baie de Quiberon au pied externe du banc sableux qui s'accroche à l'est de la pointe du Conguel. Il forme une mince bande de 300 m de long sur 30 m de large. Cette aspect "boursouflé" de l'enregistrement résulte de la présence sur un fond grossier graveleux et relativement homogène (FA n° 8 en Annexe 6.3) de petites taches plus claires de quelques m^2 de surface présentant un faible relief (fig. 26). La présence de platiers rocheux affleurant à proximité immédiate de ce faciès n'a pas permis de comprendre ce faciès dans de bonnes conditions d'observations par vidéo sous-marine.

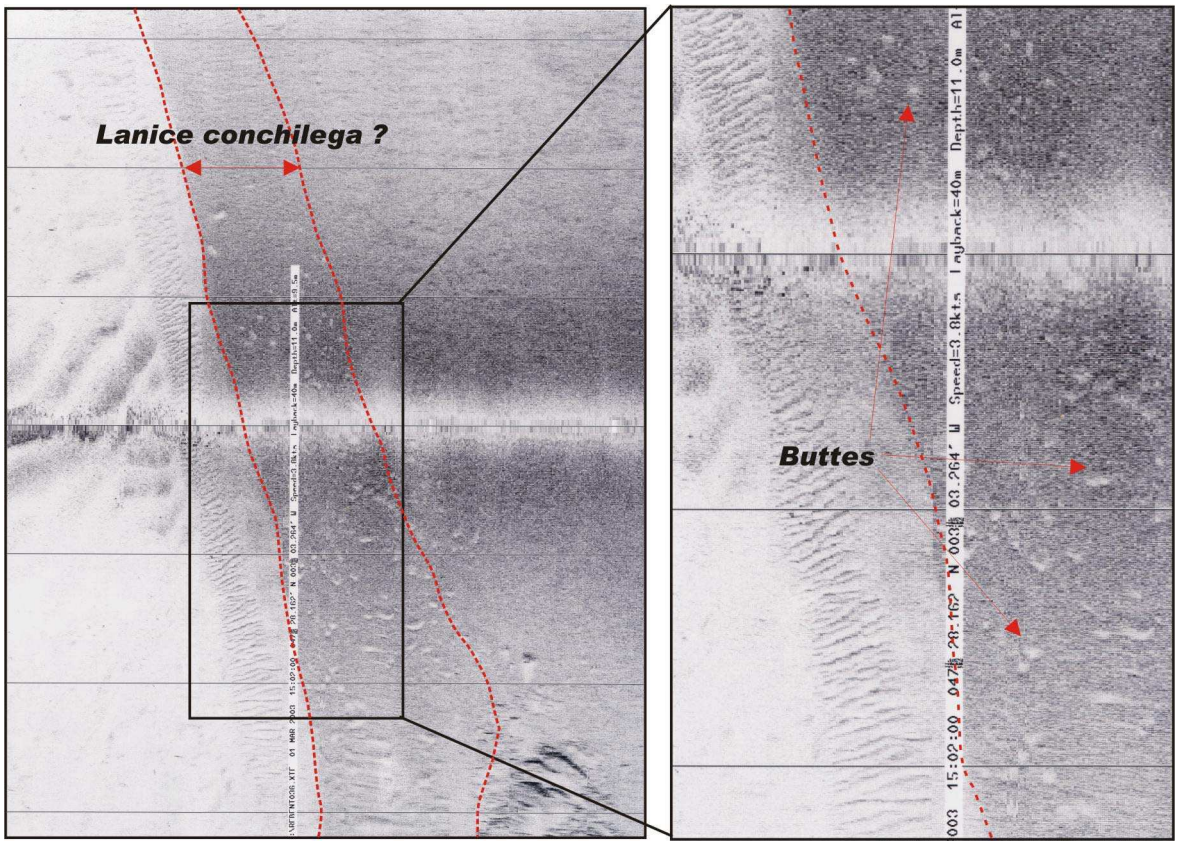


Figure 26 : Faciès acoustique montrant des petites buttes sur un fond grossier en baie de Quiberon
(échelle : 25 m entre deux lignes horizontales)

L'hypothèse la plus probable, en tenant compte de l'aspect du faciès, de sa position géographique au pied du banc sableux, de l'intensité des agents hydrodynamiques et de la présence d'une couverture

sédimentaire sableuse mobile, est que cette signature très localisée s'apparente aux biocénoses de *Lanice conchilega*. Le lanice vit sur un sédiment grossier, dans un sable parfois légèrement envasé mais rarement dans la vase. C'est un ver sédentaire filtreur vivant dans un tube, incrusté de sable grossier et de débris coquilliers, et qui dépasse de 1 à 3 cm du fond. Le tube se termine par des filaments rigides ramifiés donnant à l'ensemble l'aspect d'un petit arbre (fig. 27). Le tube s'enfonce dans le sable sur 15 à 30 cm. Il peut former des populations très denses formant des "gazons" et des "buttes" qui stabilisent le sédiment sablo-coquillier en mouvement. En fonction de la densité sur le fond, cette espèce adapte son comportement alimentaire (Buhr et Winter, 1977). Lorsque les lanices sont en forte densité (plusieurs milliers d'ind./m^2), l'effet de compétition force l'animal a adopter un mode suspensivore. Ils consolident le sédiment et empêchent l'installation d'espèces fouisseuses. Ropert et Dauvin (2000) ont dénombré jusqu'à 3300 ind./m^2 en baie des Veys, cette concentration pouvant atteindre 20 000 ind./m^2 après une période de recrutement (Buhr et Winter, 1977). Ils ont depuis longtemps été détectés par sonar à balayage latéral (Augris et *al.*, 1993 ; Berné, 1991) et notamment par Degraer et *al.* (2002) dans les mêmes conditions hydrodynamiques sur les fonds grossiers au pied du Trapegeer bank.

Figure 27 : Photo de *Lanice conchilega*

d) Faciès acoustique tacheté à *Asterias rubens* ou *Amphiura filiformis* ?

Au sud de la baie de Concarneau, à 1,5 miles au NE des Moutons sur un fond plat homogène de sable fin envasé, entre 20 et 22 m de profondeur (FA n°3 en Annexe 6.1), l'imagerie sonar a montré en mars 2003 la présence de taches sombres plurimétriques à pluridécamétriques (faciès œillet, fig. 28), relativement circulaires de quelques mètres à une cinquantaine de mètres de diamètre, localisées dans une zone elliptique (700 x 1200 m) où se concentrait à cette période, une forte activité de pêche (fig. 29). Ce secteur dont les fonds sont riches en bivalves et poissons plats, est régulièrement exploité par les coquilliers et fileyeurs de Concarneau.

Pour comprendre ce faciès, deux profils à la vidéo sous-marine ont été enregistrés lors de la campagne biologique d'octobre 2003, l'un à la troïka (RB2_Tr2) et l'autre au bâti ponctuel (RB2_Bat14). Des observations complémentaires en plongée ont été réalisées le 21/10/2003 sur ce secteur par Xavier Caisey (DEL/PC), David Coroller (TMSI/RED/EM) et Christian Mingant (DRV/RA/PI/Argenton).
Le profil vidéo à la troïka (RB2_Tr2) ne montre pas d'agrégations d'étoiles (*Asterias*) sur le fond alors qu'il traverse toute la zone sonar. En revanche, les ophiures (*Amphiura filiformis)* sont denses comme le montre également les photos prises en plongée (fig. 30b), sans toutefois pouvoir discerner des tâches de plus fortes concentrations susceptibles de répondre acoustiquement.

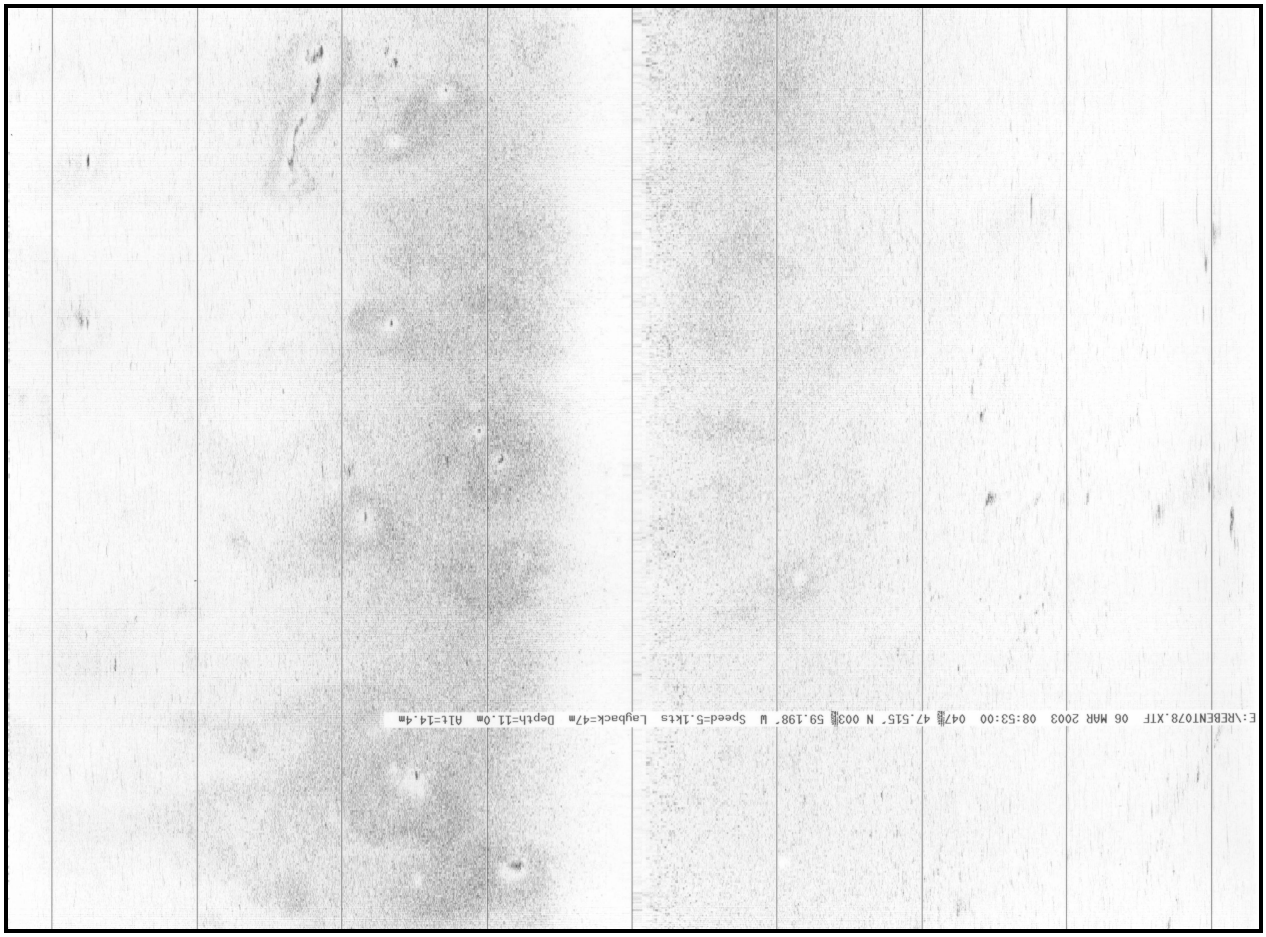


Figure 28 : Faciès acoustique œillet sur la couverture de sable fin envasé
(échelle : 25 m entre les lignes verticales)

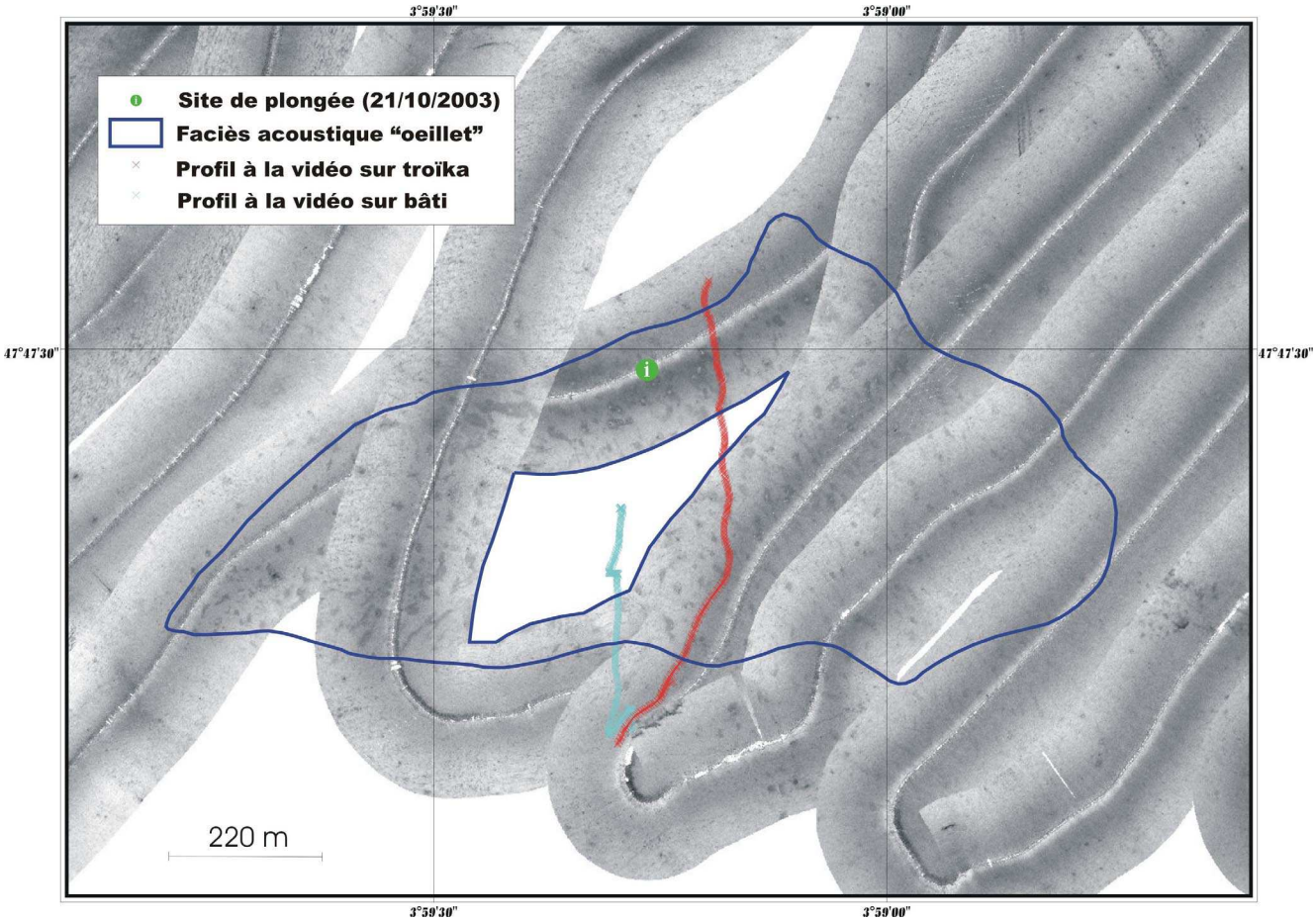


Figure 29 : localisation de la zone tacheté

a b

Figure 30 : Observations directes du fond en octobre 2003
(a : concentration d'*Asterias rubens* ; b : colonisation par *Amphiura filiformis* dont seuls les bras très fins sont visibles)

Effectué au cours de la même journée, le profil vidéo au bâti réalisé une centaine de mètres plus à l'ouest, a traversé, sur environ 50 m, une concentration d'étoiles (*Asterias* majoritairement) (fig. 30a). En février 2004, profitant d'un transit vers le port de Concarneau depuis l'archipel de Glénan, cette zone a été insonifiée avec le Reson Seabat 8101 de la vedette Mesuris et aucune tache fortement rétrodiffusante n'a été détectée.

L'hypothèse la plus probable est que ces tâches acoustiques, sombres et épisodiques, sont la réponse d'agrégats d'étoiles masquant un fond sablo-vaseux homogène (augmentation de la rugosité du fond et de la "granulométrie"). Le caractère provisoire de ces observations par sonar entre mars et octobre 2003 concorde avec le comportement invasif et temporaire de ces échinodermes, dicté par la présence de proies dans le sédiment. Dans les années 80, M. Guillou a relevé pendant plusieurs années, dans le même secteur, des concentrations en étoiles de mer (*Marthasterias glacialis, Asterias rubens*) dont la récolte pouvait atteindre 1 tonne par jour et par bateau de pêche (com. pers.). Ce type d'agrégation n'était pas rare et concernait l'ensemble des baies de la façade atlantique et particulièrement la baie de Douarnenez (Guillou, 1985). Les études menées par Guillou sur *Asterias rubens* montrent que cette espèce peut évoluer de façon différente selon la quantité de nourriture dont elle dispose. Les étoiles de mer se concentrent sur les bancs de coquillages directement visibles et aussi sur les milieux fraîchement dragués où une quantité importante de bivalves est remise à la surface du sédiment.

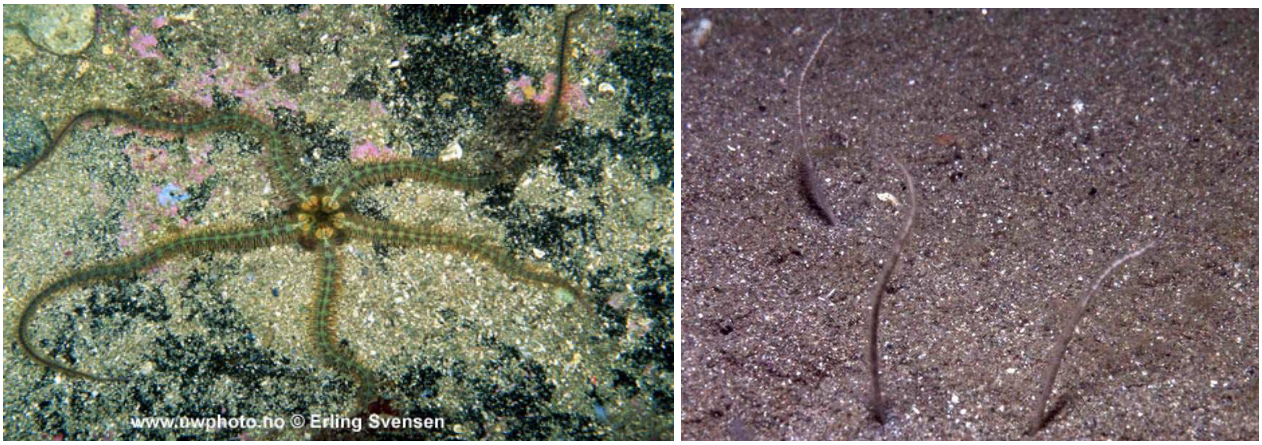
De telles concentrations spatiales, comme le suggère la fig. 31, n'ont jamais véritablement été mises en évidence par les moyens d'imagerie acoustique. Hughes (1998) souligne qu'un système comme RoxAnn (Annexe 15) est capable de limiter grossièrement les zones de fortes concentrations.
Si cette possibilité de détecter les agrégats d'étoiles de mer par sonar à balayage latéral se vérifie, dans la mesure où la validation par vidéo sous-marine ou plongeur peut se faire au moment du levé, l'outil acoustique pourra fournir des informations utiles et précieuses. Il n'est pas incertain non plus qu'*Amphiura filiformis* (fig. 32a et 32b), dont la densité peut atteindre 2000 ind.m^{-2} (Rosenberg et *al.*, 1997), fournisse une réponse acoustique spécifique.

e) Faciès acoustique tacheté à *Ophiocomina nigra* ?

Sur l'ensemble des nappes de maërl modelées de petites dunes hydrauliques, observées sur la terrasse entre Concarneau et Trévignon, une seule, à l'ouest de Trévignon, en rebord du talus vers 12 m de profondeur, montre un faciès acoustique rugueux, dépourvu de mégarides et qui présente de petites taches plus sombres de quelques m^2 de surface (fig. 33). Un relevé vidéo au bâti (RB2_Bât1) le 18

octobre 2003 a révélé la présence de taches dispersées d'*Ophiocomina nigra* presque exclusivement sur un fond de maërl pur (fig. 34a et b).

Figure 31 : Photo sous-marine d'une concentration d'étoiles de mer sur le fond en baie de Douarnenez (Source M. Guillou - prise de vue Christian Petron, extrait du film Ecorade, 1982)



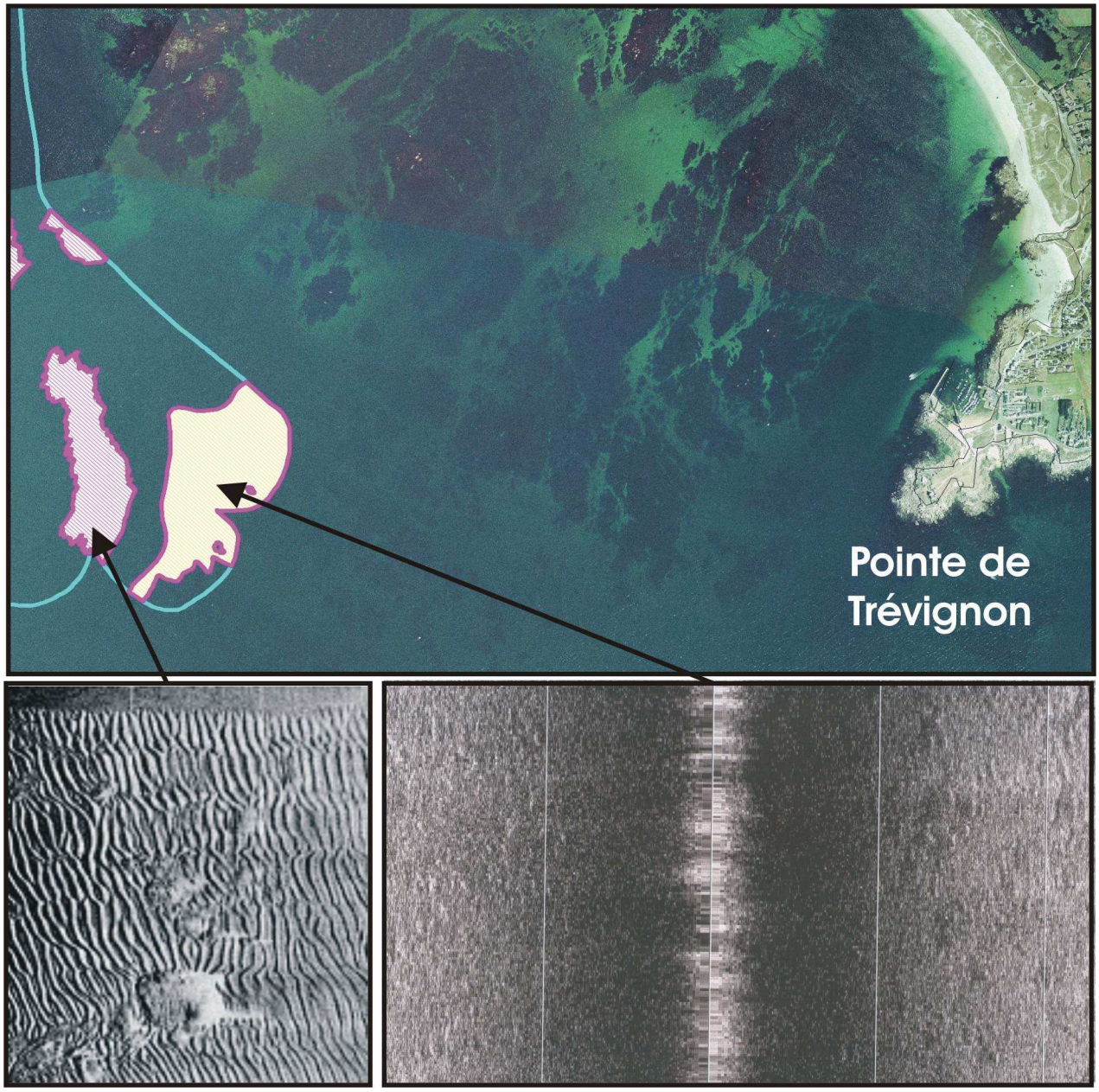
a b

Figure 32 : *Amphiura filiformis* sur le sédiment (a) et enfouie le plus généralement (b)

Les adultes d'*Ophiocomina nigra* possèdent un disque lisse de 25 mm de diamètre environ muni de longs bras, généralement 5 fois plus grands que le diamètre du disque (fig. 34c). C'est une espèce que l'on observe sur des fonds relativement grossiers et modérément exposés, avec des densités pouvant atteindre plusieurs centaines d'individus au m^2 (Hughes, 1998). Elle est parfois associée à *Ophiothrix fragilis* qui présente le même comportement grégaire. Les fonds de maërl sont régulièrement le siège de colonisation par *Antedon bifida* et *Ophiocomina nigra* avec des agrégations denses pouvant atteindre 1200 ind.m^{-2} (Birkett et *al.*, 1998). En fonction de la densité d'ophiures sur le fond, l'accumulation de squelettes carbonatés modifiera l'effet de surface moyen sur un pixel de la nappe de maërl.

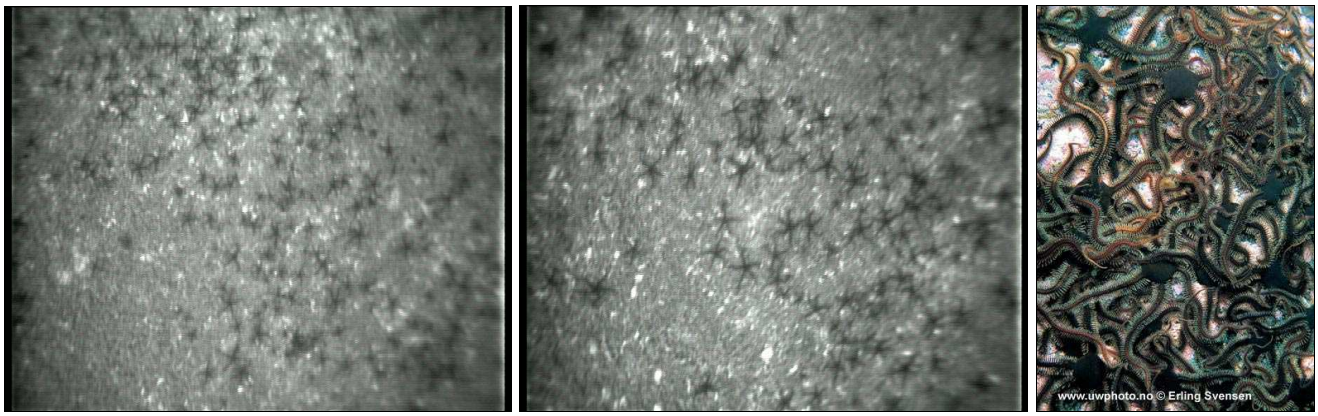
4.2 – Le système RoxAnn : sa place dans la stratégie Rebent ?

RoxAnn est le SACLAF (Annexe 15) le plus distribué dans les équipes de recherche (plus de 700 unités vendues) depuis 14 ans (Chivers et *al.*, 1990 ; Chivers et Burns, 1992) et aussi le plus utilisé pour la reconnaissance des habitats marins. Ce système a fait l'objet d'importants travaux de synthèse (Foster-Smith et *al.*, 1999; Hamilton, 2001). L'essai d'un tel système loué à la société écossaise Stenmar pendant la durée de la première campagne, s'inscrivait donc naturellement, dans les objectifs de tester différents moyens acoustiques pour délimiter les habitats marins.



a b

Figure 33 : zones de maërl pur modelé de mégarides (a) et à *Ophiocomina nigra* (b) (échelle : 25 m entre deux lignes verticales)



a b c

Figure 34 : Photos d'agrégats d'*Ophiocomina nigra* en baie de Concarneau (a et b) et en mer de Norvège (c, © Erling Svensen)

RoxAnn a été employé avec succès pour cartographier directement les biocénoses de maërl (De Grave et *al.*, 2000), les récifs coralliens (Williamson, 1998 ; Chevillon, 2001 ; Nunny et *al.*, 2001) ou bien des moulières (Service, 1998). Son intérêt réside dans sa capacité à détecter rapidement et à moindre coût, la nature des fonds qui est, *a posteriori*, corrélée aux peuplements faunistiques par un échantillonnage stratifié (Murphy et *al.*, 1995 ; Sotheran et *al.*, 1995 ; Provencher et *al.*, 1997 ; Pinn et *al.*, 1998). Les exemples sont nombreux et ne se limitent pas uniquement aux biocénoses très "rugueuses" directement décelables par le système. Il a également été mis en œuvre pour cartographier les limites des habitats à poissons plats (Greenstreet et *al.*, 1997) ou à harengs (Maravelias et *al.*, 2000) et de nombreux mollusques à valeur commerciale, tels que les coquilles Saint-Jacques (Magorrian et *al.*, 1995 ; Kaiser et *al.*, 1998). En France, ce système a suscité peu d'intérêt de la part de la communauté scientifique, sauf celui de la Marine Nationale dont les navires océanographiques en sont équipés depuis 1992 sur des bases acoustiques émettant à 40 kHz environ. Dans tous les travaux liés à RoxAnn, la précision des limites sédimentaires ou biosédimentaires cartographiées par ce système demeure frustre, au regard de ce que peut fournir un SBL par exemple.

Comme pour le DF1000 (*cf.* § 4.1.2.2a), les données RoxAnn montrent peu de variabilité sur les platiers rocheux sous-marins cartographiés avec précision par le SBL. On constate des fluctuations plus fortes pour l'indice de rugosité (E1) sans pour autant être capable, faute de validations terrain, de les relier à la présence d'un couvert végétal dense (fig. 35) ou à la structure même des massifs rocheux.

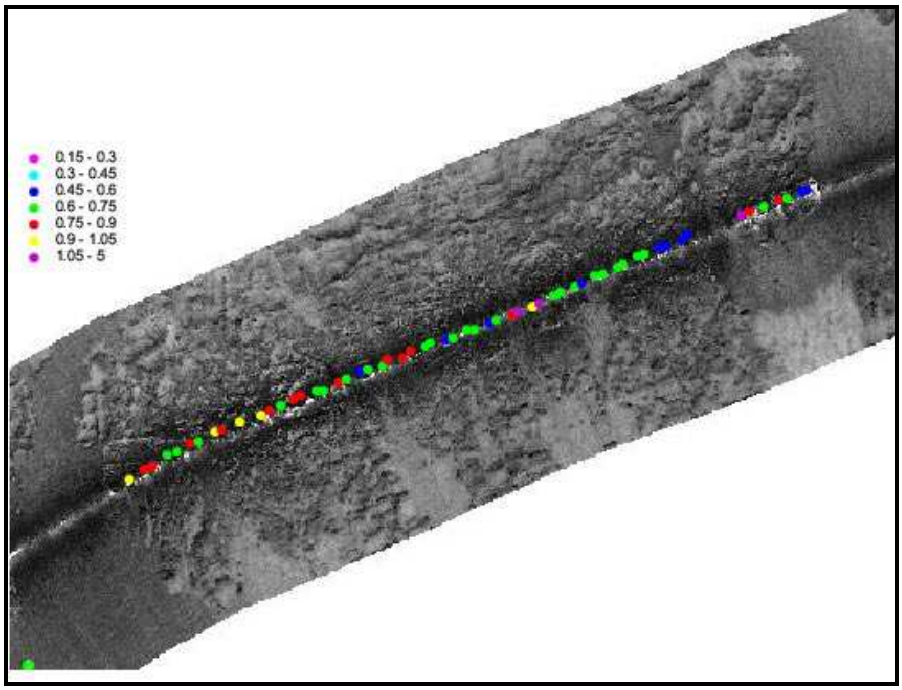


Figure 35 : Croisement de l'indice de rugosité E1 avec un platier rocheux à 10 m de profondeur à l'ouest de Beg Meil

Pour mesurer la précision de ce système, les jeux de données des 3 secteurs n'ont pas été analysés, ni de manière subjective (conjugaisons de boîtes selon la méthode traditionnelle, Annexe 15), ni de façon objective (Analyse en Composantes Principales par exemple), mais croisés sous Arcview avec les polygones morphosédimentaires déduits de l'interprétation des faciès sonar et calibrés par les prélèvements. Cette opération inverse montre sur les diagrammes E1/E2 (fig. 36a, b et c), un chevauchement important quasiment de tous les types sédimentaires rencontrés sur les 3 secteurs ; seuls les faciès à GrVM , SfV, StfV ou VStf sur Quiberon et VSf, Sf, SgGr ou Maërl sur Glénan tendent à s'individualiser. Cette confusion dans les réponses sédimentaires montre les limites d'un tel système en terme de résolution et de différenciation sédimentaire et ceci, quel que soit le mode de classification adopté à l'échelle d'une baie comme celle de Concarneau ou d'un grand secteur comme l'archipel de Glénan.

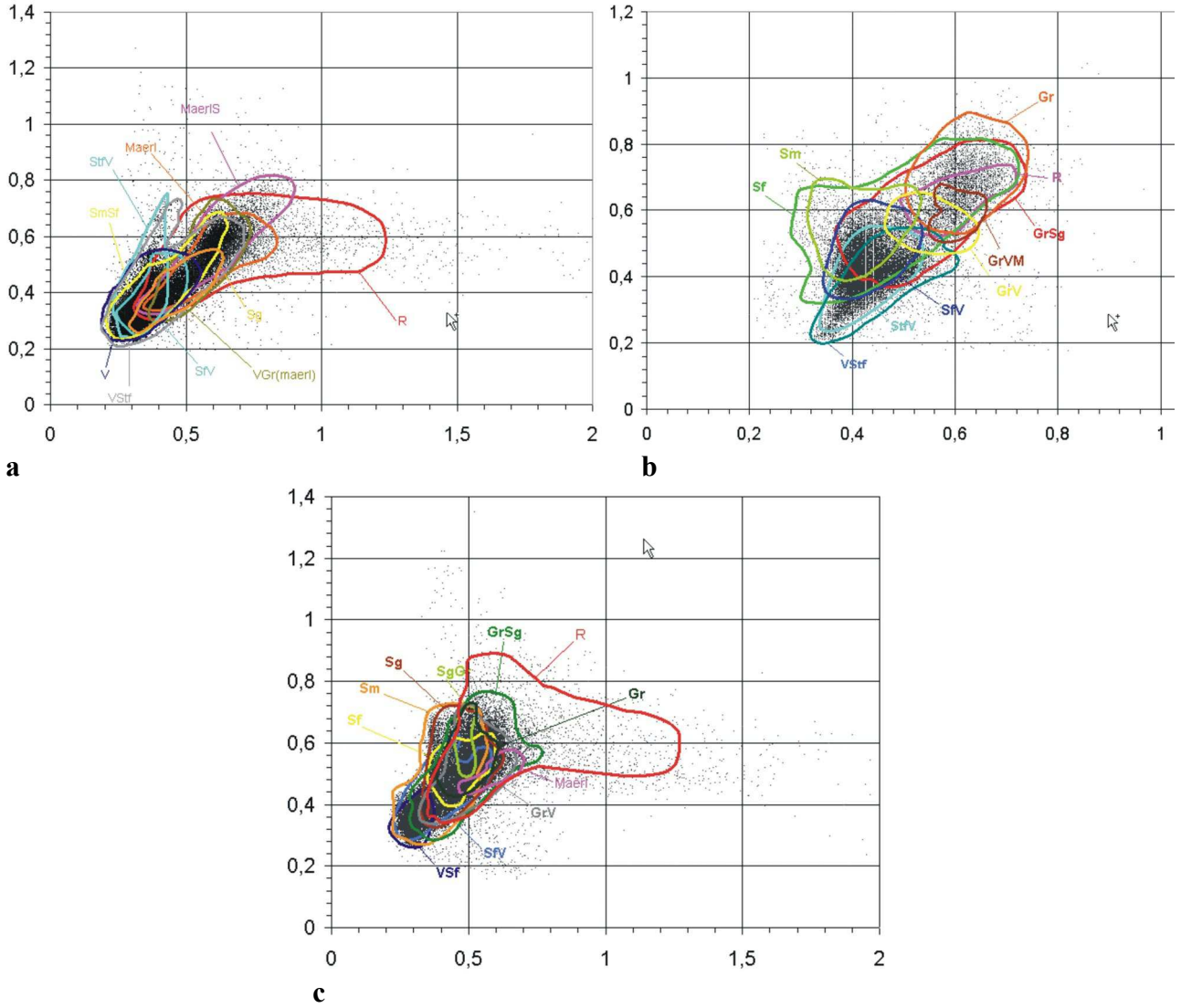


Figure 36 : Couples E1/E2 des valeurs RoxAnn
(a : Concarneau, 89154 couples ; b : Quiberon, 31244 couples ; c : Glénan, 50424 couples)
(R : Roche ; Gr : Gravier ; Maërl : Maërl ; Sg : Sable grossier ; Sm : Sable moyen ; Sf : Sable fin ; Stf : Sable très fin ; V : Vase)

En excluant les conditions météorologiques globalement, plutôt bonnes et constantes sur toute la durée de la campagne et les interférences électroniques avec le SMF EM1000 des journées du 4 et 6/03/2003, plusieurs raisons pourraient expliquer ce constat :

(1) Le rôle de la fréquence : Sur le N/O Thalia, la fréquence disponible sur le Furuno FE881 est 200 kHz. Or les meilleurs résultats de classifications sédimentaires sont généralement obtenus pour des fréquences plus basses (120 à 40 kHz) jusqu'à 70 m de profondeur (Schlagentweit, 1993 ; Magorrian et *al*., 1995 ; Kloser et *al*., 2001). Pinn et Robinson (1998) vont jusqu'à cartographier les limites de répartition de *Nephrops norvegicus* en isolant à 40 kHz, la réponse "rugueuse" du substrat engendrée par l'activité de bioturbation de cette espèce dans le sédiment. Les moyennes fréquences pénètrent dans le sédiment sur plusieurs décimètres à quelques mètres en fonction de sa granulométrie et de ses propriétés physiques (degré de compaction, teneur en eau…). Ehrhold (2001a) a cartographié entre Concarneau et Glénan les vases à pockmarks (fig. 37) avec le système RoxAnn (40 kHz) des navires océanographiques de la Marine, les mêmes qui paraissent "transparentes" à 200 kHz en baie de Concarneau.

(2) Le rôle de l'ouverture du sondeur : celle du Furuno FE881 est de 5,4° à 200 kHz. D'après Foster-Smith et *al*. (1999), l'ouverture du faisceau est primordiale. Une grande ouverture permet d'intégrer dans le calcul de E1 par l'USP, une plus longue terminaison du signal principal. Pour cette raison, ces auteurs, ainsi que Collins et Voulgaris (1993), recommandent

que les sondeurs opérant avec le système RoxAnn aient une ouverture modérée de 12 à 25° au détriment de la résolution.

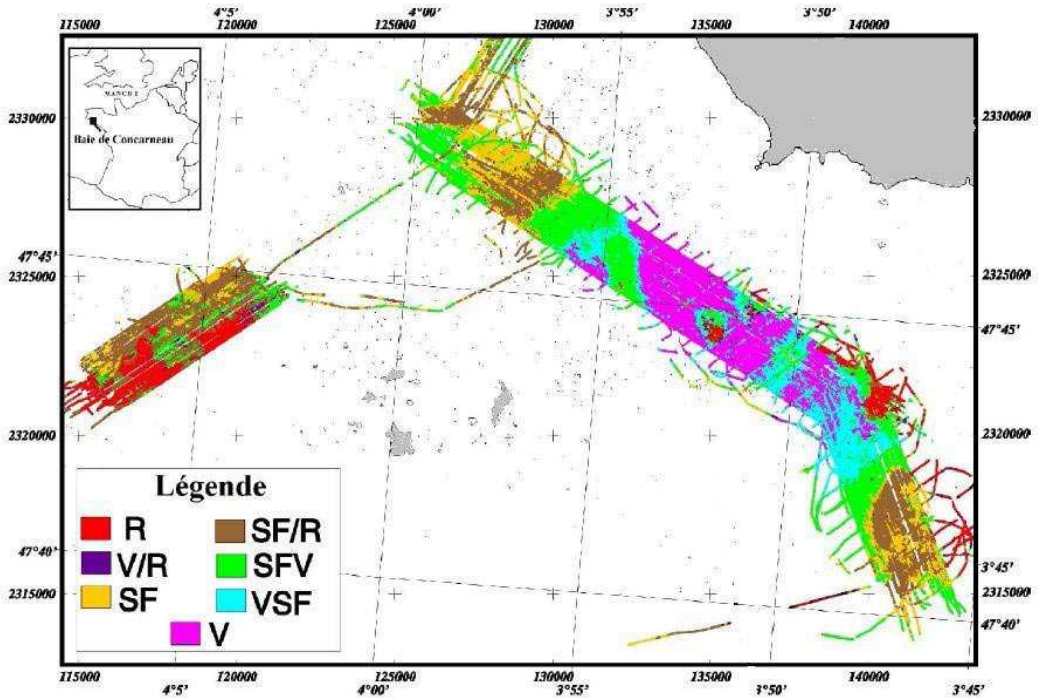


Figure 37 : Classification des données RoxAnn dans les passes entre Glénan et Concarneau à 40 kHz (Ehrhold, 2001a)

Les facteurs qui contrôlent la variabilité des données RoxAnn en mer sont multiples (Ehrhold, 2001a) :

- la fréquence d'émission qui joue sur l'effet de volume (pénétration dans le sédiment),
- l'angle d'ouverture qui modifie la résolution spatiale,
- la profondeur et l'état de la mer qui engendre des pertes de diffusion importantes sur E2,
- les propriétés physiques des sédiments (granulométrie, porosité, densité…),
- la morphologie du fond (présence de figures sédimentaires) et la micro-topographie (rides, algues),
- la concentration importante en suspensions dans la colonne d'eau et en organismes sur le fond.

Si en terme de résolution, les limites d'un système comme RoxAnn sont peu évolutives et conditionnées par les caractéristiques électroniques propres au sondeur vertical, plusieurs auteurs proposent d'améliorer la discrimination des faciès biosédimentaires en limitant la classification à de petites zones. Ehrhold (2000 ; 2002) a montré que ce système était capable de différencier, sur des zones limitées spatialement et à faible variabilité sédimentaire, les champs de grandes hydrauliques dans le Pas de Calais, ou les faciès de mélange grossier autour des îles de Houat et Hoëdic (2000). Provencher et *al*. (1997) préconisent de diviser l'aire d'étude en fonction de critères géomorphologiques et de calibrer indépendamment chacune des zones retenues. Nunny et *al*. (2001) et Sorensen et *al*. (1998) recommandent pour leur part de réduire les variabilités sur les 2 indices en effectuant une classification quotidienne des jeux de données afin de prendre en compte l'état de la mer et en augmentant la densité des profils localement.

Le sonar DF1000 remorqué ou l'imagerie sonar de coque sur Vedette sont les pièces maîtresses dans les levés Rebent pour caractériser préalablement les habitats. Les profils réalisés sur chacun des secteurs sont définis pour optimiser la qualité des enregistrements et le rendu du mosaïquage (cf. § 3.1.1). Dans la stratégie Rebent, l'utilisation d'un système comme RoxAnn serait donc subordonnée

aux levés sonar. Un système RoxAnn à moyenne ouverture (12 à 25°) et moyenne fréquence (40 kHz) équipant le N/O Thalia ou la vedette côtière compléterait la connaissance des fonds sur les secteurs Rebent, notamment sur les fonds où une mince couche sédimentaire recouvre le substrat en place (maërl sur vase, sable fin sur vase, etc.). La sensibilité du système RoxAnn sur les champs d'algues n'a pas été démontrée dans ce travail, faute d'une validation par plongée ou vidéo sous-marine suffisante. Sorensen (1999) montre qu'à 200 kHz, les herbiers de posidonies le long de la côte de Cartagène ne sont pas détectés par RoxAnn, alors que Siakavara et Lazaridou (2000) ont cartographié ces mêmes biocénoses dans les baies de Strymonikos et Ierissos, avec un Simrad EK500 en opérant à des fréquences plus basses (38 et 120 kHz).

5 – Conclusions

Les objectifs de ce post-doctorat étaient d'assurer le démarrage opérationnel du Rebent pour le volet sectoriel subtidal au printemps 2003, et d'établir, sur la base de données bibliographiques et des premiers résultats de campagnes, des procédures et des guides permettant d'assurer le suivi, le traitement et la qualité des données géoacoustiques. Ce travail a donc conduit à explorer les jeux de données acquis avec différents systèmes, à tester les configurations théoriques, et à rédiger un certain nombre de documents techniques nécessaires à la compréhension de la démarche ainsi adoptée.

En 2003, le réseau est passé de sa phase conceptuelle (APS puis APD), à sa mise en œuvre sur 3 chantiers en Bretagne sud : baies de Quiberon et de Concarneau, archipel de Glénan. L'approche subtidale des secteurs Rebent s'appuie sur une combinaison étroite d'outils acoustiques, pour la reconnaissance morphologique et sédimentaire des fonds marins, en complément des orthophotographies littorales qui font le lien avec l'approche intertidale. Leur utilisation est un préalable pour optimiser *in fine* la caractérisation biologique des habitats.

La démarche spatiale vise à prospecter toute la zone subtidale d'un secteur, ce qui la rend particulièrement originale et innovante au regard des expériences étrangères dans ce domaine, mais qui suppose *a fortiori* de mettre en œuvre dans la durée, des moyens lourds et sophistiqués, faisant appels à de multiples compétences. L'approche horizontale s'articule, du large vers la plage, de la manière suivante :

- Une prospection à partir d'un navire océanographique côtier, comme le N/O Thalia, jusqu'à 10 m de profondeur environ pour les secteurs côtiers les plus escarpés (5 m pour les littoraux en pente douce vers le large) ;

- Relayée pour la bande littorale, inaccessible au navire côtier avec un engin remorqué et "opaque" à l'interprétation des orthophotos littorales, par une vedette transportable par route (exemple du Survex de la société Mesuris).

La configuration "systèmes" retenue, utilise comme pièce maîtresse, l'imagerie sonar latéral pour discriminer les types de fonds ; soit remorquée à partir du Thalia (cas du DF1000 bi-fréquences de la société Edgetech), soit en poste sous la coque d'une vedette côtière combinée au sondeur multifaisceaux (location d'un SMF Reson Seabat 8101 avec option sonar). Si le DF1000 a donné pleinement satisfaction dans la reconnaissance pointue des unités morpho-sédimentaires, l'imagerie du Reson Seabat 8101 pourrait être avantageusement remplacée par le modèle 8111 fonctionnant à 100 kHz, ou un autre système utilisant une fréquence équivalente.
Les SMF (Sondeur MultiFaisceaux) constituent les deuxièmes éléments de la chaîne d'acquisition en subtidal, fournissant les MNT bathymétriques. Le SMF EM1000 de la société Simrad nécessite d'embarquer sur le N/O Thalia un container technique condamnant presque l'intégralité de la plage arrière, alors que la future vedette côtière sera équipée d'un SMF petit fond de dernière génération. Le volet bathymétrique du Rebent pourra évoluer en fonction des résultats attendus des levés aéroportés au LIDAR à absorption différentielle qui devrait

concerner une partie du littoral français dans le cadre du futur programme LITHO3D (SHOM/IGN).
Enfin, un système comme RoxAnn (Acoustic Ground Discrimination System) devrait compléter la caractérisation sédimentaire des secteurs prospectés, mais les résultats obtenus lors de la première campagne sont mitigés et suggèrent d'opter pour une autre configuration, en passant à une fréquence plus faible et une ouverture plus grande du sondeur vertical. Il s'agira de concevoir l'achat d'un ou deux systèmes RoxAnn (1 fixe et 1 mobile pour N/O Thalia et vedette) avec leurs propres bases acoustiques.

L'effort de calibration des réponses acoustiques consenti à partir d'observations croisées par prélèvements sédimentaires et vidéo sous-marine en mars puis octobre 2003, a été très important. C'est un élément fondamental pour la compréhension des données d'imagerie acoustique, conduisant notamment à la rédaction de fiches types pour chaque réponse acoustique. Les résultats de la première campagne ont cependant mis l'accent sur le degré de réactivité nécessaire à bord pour voir et calibrer les faciès acoustiques, qui demandera l'acquisition de nouveaux outils de visualisation en temps réel ou léger différé, afin de valider les échos acoustiques particuliers (faciès tacheté par exemple) et de lever les ambiguïtés et les interrogations sur la détection de biocénoses spécifiques.
Toutes les données acquises à bord, soient spécifiques à chaque système de mesure (SBL, SMF, AGDS), soient les évènements enregistrés par Casino+ (marégraphe, tirs sonde XBT, prélèvement, observation...), ou soient liées aux paramètres de navigation enregistrés par Olex, ont pour vocation de migrer vers une interface unique de type SIG (Système d'Informations Géographiques), indispensable pour formater les différents jeux de données dans un même référentiel (ponctuel, linéaire, raster géoréférencé), pour manipuler et gérer les volumes de données géoréférencées et enfin pour les traduire sous la forme de documents de synthèse vectorisés, intégrables dans la base de données Rebent.

Rebent, en tant que réseau à vocation nationale, permettra de mieux connaître la richesse biologique des fonds marins côtiers, d'en dresser des inventaires, de suivre l'évolution des habitats et de participer à la préservation du patrimoine marin. Les données produites répondront en partie à d'autres préoccupations comme celles liées à la Directive Cadre Eau ou à la modélisation de la distribution d'espèces macrobenthiques. Outre l'aspect de surveillance, il apparaît au regard des tous premiers résultats géomorphologiques, obtenus sur les 3 secteurs reconnus en 2003 et résumés dans le tableau 9, que cette approche fournira des avancées scientifiques majeures mettant en relief la complexité du compartiment écologique et géomorphologique littoral, au demeurant encore mal connu. Ces données pourront être exploitées aussi bien par les benthologues, que les géologues, acousticiens ou hydrodynamiciens.

Principaux Résultats	Baie de Concarneau	Baie de Quiberon	Archipel de Glénan
Distribution des faciès sédimentaires	Gradient sédimentaire croissant vers l'Ouest	Gradient sédimentaire décroissant vers le Nord	Pas de véritable gradient sédimentaire
	Origine et pérennité des nappes de crème de vase	Figures sédimentaires de haute énergie sur les flancs des deux bancs sableux	Environnement dominé par des fortes conditions hydro-logiques qui imposent des séquences sédimentaires tronquées
	Faciès de type "Mixed sediment"	Faciès de type "Mixed sediment"	
	Dépression vaseuse au pied de la terrasse orientale recouverte de cratères de diamètre métriques à pluri-décamétriques (pockmarks)	Distribution complexe des sédiments à l'entrée de la baie sous le jeu de puissants courants de marée	Distribution complexe des sédiments essentiellement constitués de mélanges grossiers
	Ces pockmarks sont-ils la conséquence de remontées de fluides ou de gaz ?		
	Ce champ qui se poursuit au-delà de Glénan est-il toujours en activité ?		
	Comment expliquer l'absence de colonies d'haploops en forte densité dans le creux des cratères ? (effet explosif spontané, bouffées de gaz...)		
Dynamique sédimentaire	Direction résiduelle de transport sédimentaire vers l'Est à l'Ouest des Moutons	Direction résiduelle de transport sédimentaire vers le N/NE au droit du banc de Quiberon	Circulation anti-horaire des sédiments autours de l'archipel
	Transport sédimentaire "cross-shore" à l'Ouest de Beg Meil	Réfraction vers le N/NW à l'Ouest du banc de Quiberon	
	Mégarides de maërl préférentiellement polarisées vers le NE sur la terrasse entre Concarneau et Trévignon	Transport vers le SW dans sur les fonds envasés de la partie interne de la baie	
Détection des biocénoses	Cartographie très fine des limites des gisements de maërl pur dans les très petits fonds	Cartographie des peuplements de crépidules	Gisement de maërl pur très limité au Nord des Pierres noires
	Détection directe de Maldanes, d'agrégats d' étoiles de mer et d'ophiures à confirmer	Détection directe de Maldanes, d'agrégats d' étoiles de mer à confirmer	

Tableau 9 : Synthèse des principaux résultats scientifiques sur les 3 secteurs levés

REFERENCES :

Augris C., Clabaut P., Bourillet J.F. et Dewez L. (1993). Notice explicative de la carte morpho-sédimentaire du domaine marin côtier entre Dieppe et le Tréport (seine Maritime). Edition IFREMER, 48 p.

Augris C. et Hamon D. (coordinateurs) et *al.* (1996). Atlas thématique de l'environnement marin en baie de Saint-Brieuc (côtes d'Armor). Edition IFREMER, 72 p., 20 cartes.

Belsher T. et Houlgate E. (2000). Etude des sédiments superficiels marins, des herbiers à phanérogames et des peuplements de *Caulerpa taxifolia,* de Menton au Cap d'Ail. Notice Carte Ifremer, 43 p.

Birkett D.A., Maggs C. et Dring M.J. (1998). Maërl ; An overview of dynamic and sensitivity characteristics for conservation management of marine SACs. Scottish Association for Marine Science, UK Marine SACs Project report, volume V, 117 p.

Buhr, K.J. & Winter, J.E., 1977. Distribution and maintenance of a *Lanice conchilega* association in the Weser estuary (FRG), with special reference to the suspension-feeding behaviour of *Lanice conchilega*. In Proceedings of the Eleventh European Symposium of Marine Biology, University College, Galway, 5-11 October 1976. Biology of Benthic Organisms (ed. B.F. Keegan, P.O. Ceidigh & P.J.S. Boaden), pp. 101-113. Oxford: Pergamon Press.

Cabioch L. (1968). Contribution à la connaissance des peuplements benthiques de la Manche occidentale. Cahier de biologie marine, Tome IX, cahier 5 (supplémentaire), p. 493-720.

Cabioch L. (1971). Etude sur les corallinacées. I - Caractères généraux de cytologie. II - La morphogénèse : conséquences systématiques et phylogénétiques. *Cah. Biol. Mar.*, 12, p. 121-186 et *Cah. Biol. Mar.*, 13, p. 137-287.

Chassé C. et Glémarec M. (1976). Atlas des fonds meubles du plateau continental du golfe de Gascogne :cartes biosédimentaires. Université de Bretagne Occidentale, 8 p., 6 cartes, 85 cm.

Chassé C. et Glémarec M. (1983) Fonctionnement d'écosystèmes côtiers sensibles : Baies de Concarneau et de Douanenez. IV - Réflexions et propositions sur un projet de cartographie bionomique des côtes françaises. Brest, Institut d' études marines, non paginé.

Chevillon C. (2001). Caractérisation des types de fonds et habitats benthiques par classification hydro-acoustique dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. Rapport IRD.

Chivers R.C., Emerson N. et Burns (1990). New Acoustic Processing for Underway Surveying. The hydrographycal journal, 56, p. 9-17.

Chivers R.C. et Burns D. (1992). Acoustic surveying of the sea bed. Acoust. Bull., 17(1), p. 5-9.

Cochrane G.R et Lafferty K.D (2002). Use of acoustic classification of sidescan sonar data for mapping benthic habitat in the Northern Channel Islands, California. Continental Shelf Research, Vol. 22, 5, p. 683-690.

Collins M.B. et Voulgaris G. (1993). Empirical field and laboratory evaluation of a real-time acoustic sea bed surveying system. Proceedings of the Institute of Acoustics, 26, p. 343-352.

Connor D.W., Brazier D.P., Hill T.O. et Northen K.O. (1997a). Marine Nature Conservation Review: marine biotope classification for Britain and Ireland. Volume 1. Littoral biotopes. Version 97.06. JNCC Report, N°229.

Connor D.W., Dalkin M.J., Hill T.O., Holt R.H.F. et Sanderson W.G. (1997b). Marine Nature Conservation Review: marine biotope classification for Britain and Ireland. Volume 2. Sublittoral biotopes. Version 97.06. JNCC Report, N°230.

Dauvin J.C. (1997). Les biocénoses marines et littorales françaises des côtes atlantiques, Manche et mer du nord ; Synthèse, menaces et perspectives. Laboratoire de Biologie des Invertébrés Marins et Malacologie – Service du Patrimoine naturel, IEGB, MNHN, Paris, 376 p.

Davies J., Baxter J., Bradley M., Connor D., Khan J., Muray E., Sanderson W, Turnbull C et Vincent M. (2001). Marine Monitoring Handbook, JNCC, UK Marine SACs Project, 405 p.

Degraer S., Van Lancker V., Moerkerke G., Van Hoey G., Vincx M, Jacobs P. et Henriet J.P. (2002). Intensive evaluation of the evolution of a protected benthic habitat : HABITAT. Final report. Federal Office for Scientific, Technical and Cultural Affairs (OSTC) – Ministry of the Flemish Community, Environment and Infrastructure. Department. Waterways and Marine Affairs Administration, Coastal Waterways, 124 p.

Ehrhold A., Blanchard M., Auffret J.P. et Garlan T. (1998). Conséquence de la prolifération de la crépidule (*Crepidula fornicata*) sur l'évolution sédimentaire de la baie du Mont-Saint-Michel (Manche, France). C. R. Acad. Sci. Paris, série IIa, 327, n°9, p. 583-588.

Ehrhold A. (1999). Dynamique de comblement d'un bassin sédimentaire soumis à un régime mégatidal : exemple de la baie du Mont Saint-Michel, Thèse 3ème cycle, Université de Caen, 271 p.

Ehrhold A. (2000). Méthodologie de traitement des données RoxAnn : validation au large de la plateforme sud-armoricaine, Rapport interne, EPSHOM, n°479, 22 p.

Ehrhold A. (2001a). RoxAnn : Outil de discrimination acoustique de la nature des fonds marins, intérêts et limites. Livre des résumés, Publi. ASF, Orléans, n°36, p. 121.

Ehrhold A. (2001b). Refonte du logiciel Traitrox : logiciel de traitement, d'analyse, de visualisation et d'exportation des données du système RoxAnn. Rapport interne EPSHOM, n°583, 21 p.

Ehrhold A. (2002). Traitement des données RoxAnn sur deux champs de grandes dunes hydrauliques en Manche Orientale et Mer du Nord. Rapport interne, EPSHOM, n°25, 13 p.

Fenstermacher L.E., Crawford G.B., Borgeld J.C., Britt T., George D.A., Klein M.A., Driscoll N.W. et Mayer L.A. (2000). Enhanced acoustic backscatter due to high abundance of sand dollars, *Dendraster excentricus*. Marine Georesources & Geotechnology, vol. 19, n°2, p. 135-145.

Folk R. L. (1954). The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary nomenclature. Journal of Geology, 62, 344-359.

Foster-Smith R.L., Davies J. et Sotheran, I. (1999). Broad scale remote survey and mapping of sublittoral habitats and Biota. Report of sublittoral mapping methodology of the BMAP Project, Sea Map research group, 157 p.

Gardner J.V., Field M.E., Lee H., Edwards B.E., Masson D.G., Kenyon N.H. et Kidd R.B. (1991). Ground-truthing 6.5 kHz sidescan sonographs: what are we really imaging? Journal of Geophysical Research, Vol. 96, N°B4, p. 5955-5974.

Grall J. (2002). Biodiversité spécifique et fonctionnelle du maërl : réponse aux variations de l'environnement côtier. Thèse de doctorat de l'UBO, 302 p.

Grall J. (2003). Fiche de synthèse sur les biocénoses : les bancs de maërl. Document REBENT, Ifremer, 20 p.

Greenstreet S.P.R., Tuck I.D., Grewar G.N., Armstrong E., Reid D.G. et Wright P.J. (1997). An assessment of the acoustic survey technique, RoxAnn, as a means of mapping seabed habitat. ICES Journal of Marine Science, vol. 54, n° 5, p. 939-959.

Guillaumont et *al*. (2001). Réseau Benthique (REBENT), Développement d'un pilote breton, Elaboration de l'Avant Projet Sommaire (APS). Direction de l'Environnement et de l'Aménagement Littoral, rapport IFREMER, 112 p.

Guillaumont et *al*. (2002). Réseau Benthique (REBENT) ; Développement d'un pilote breton, élaboration de l'Avant Projet Détaillé (APD) - Phase 2. Direction de l'Environnement et de l'Aménagement Littoral, rapport IFREMER, 196 p + annexes.

Guillou M. (1985). Dynamique des populations d'étoiles de mer en baie de Douarnenez (Finistère). Oceanis, 11, Fasc. 3, pp. 253-261.

Hamilton L.J. (2001). Acoustic seabed classification systems. Rapport DSTO, TN, 0401, 75 p.

Hommeril P. (1967). Etude de géologie marine concernant le littoral bas-normand et la zone prélittorale de l'archipel anglo-normand. Thèse Sciences Naturelles, Université de Caen, Imprimerie de la Faculté des sciences, 304 p., 27 p. de planches.

Hovland M. et Judd A.G (1988). Seabed pockmarks and Seapages. Impact on geology, biology and the marine environment. Graham and Trotman, London, 293 p.

Hovland M., Vasshus S., Indreeide A., Austdal L. et Nilsen O. (2002). Mapping and imaging deep-sea coral reefs off Norway. Hydrobiologia, 471(1), p. 13-17.

Hughes D.J. (1998). Subtidal brittlestar beds: An overview of dynamics and sensitivity characteristics for conservation and management of marine SACs. Report prepared for SAMS UK Marine SACs Project, 78 p.

ISO/DIS 16665 (2003). Water quality : Guidelines for quantitative sampling and sample processing of marine soft-bottom macro fauna. 29 p.

Kaiser M.J., Armstrong P.J., Dare P.J. et Flatt R.P. (1998). Benthic communities associated with a heavily fished scallop ground in the English Channel. J. Mar. Biol. Assoc. U.K., vol. 78, n°4, p. 1045-1059.

Kendall M.S., Monaco M.E., Buja K.R., Christensen J.D., Kruer C.R., Finkbeiner M., et Warner R.A. (2001). Methods Used to Map the Benthic Habitats of Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands. (on line; http://biogeo.nos.noaa.gov/products/benthic/), NOAA National Ocean Service, Biogeography Team, 45 p.

Kenny A.J., E. Andrulewicz, H. Bokuniewicz, S. E. Boyd, J. Breslin, C. Brown, I. Cato, J. Costelloe, M. Desprez, C. Dijkshoorn, G. Fader, R. Courtney, S. Freeman, B. de. Groot, L. Galtier, S. Helmig, H. Hillewaert, J. C. Krause, B. Lauwaert, H. Leuchs, G. Markwell, M. Mastowske, A. J. Murray, P. E. Nielsen, D. Ottesen, R. Pearson, M-J. Rendas, S. Rogers, R. Schuttenhelm, A. Stolk, J. Side, T. Simpson, S. Uscinowicz, et M. Zeiler. (2000). An overview of seabed mapping technologies in the context marine habitat classification. ICES Annual Meeting, 27-30 Sep Brugge, 2000, 12 p.

Kloser R.J., Bax N.J. Ryan T., Williams A et Barker B.A. (2001). Remote sensing of seabed types in the Australian South East Fishery; development and application of normal incident acoustic techniques and associated 'ground truthing'. Mar. Freshwater Res., 52, (4), p. 475-489.

Kostylev V.E., Courtney R.C., Robert G. and Todd B.J. (2002). Stock evaluation of giant scallop (*Placopecten magellanicus*) using high-resolution acoustics for seabed mapping. Fisheries Research, *in press*.

Larsonneur C. (1971). Manche Centrale et baie de Seine : géologie du substratum et des dépôts meubles. Thèse doctorat, Université de Caen, 394 p.

Lesueur P. et Klingébiel A. (1986). Carte et notice de répartition des sédiments superficiels du plateau continental du Golfe de Gascogne, partie septentrionale (éch. : 1/500 000). Coédition BRGM/IFREMER Carte géologique de la marge continentale française, 1 carte, 1 notice, 23 p.

Magorrian B.H., Service M. et Clarke W. (1995). An acoustic bottom classification survey of Strangford Lough, Northern Ireland. J. Mar. Biol. Assoc. U.K., vol. 75, n°4, p. 987-992.

Maravelias C.D., Reid D.G. et Swartzman G. (2000). Seabed substrate, water depth and zooplankton as determinants of the prespawning spatial aggregation of North Atlantic herring. Mar. Ecol. Prog. Ser.,vol. 195, p. 249-259.

Marshall J.F. et Davies P.J. (1988). Halimeda bioherms of the northern Great Barrier Reef. Coral Reefs, vol. 6, n°3-4, p. 139-148.

Menesguen A. (1980). La macrofaune benthique de la baie de Concarneau : peuplements, dynamique de populations, prédation excercée par les poissons. Thèse 3ème cycle, UBO, 127 p.

Murphy L., Leary T. et Williamson A. (1995). Standardizing seabed classification techniques. Sea Technology, 36, p. 15-19.

Nunny R., Santana M., Stone P., Tillet D. et Wallling D. (2001). An investigation of the impact on reef environments of changing land-use in the Stann Creek district of Belize. Report M3, WRICsc publication, 330 p.

Paillard M., Gravez V., Clabaut P., Walker, P., Blanc J.J., Boudouresque C.F., Belsher, T., Urscheler F., Poydenot F. et *al.* (1993). Cartographie de l'herbier de Posidonie (Posidonia oceanica) et des fonds marins environnants de Toulon a Hyeres (Var - France): reconnaissance par sonar lateral et photographie aerienne. Notice de presentation. Document Ifremer, 3 maps in Annex, 36 pp

Pasqualini V., Pergent-Martini C., Clabaut P. & Pergent G. (1998). Mapping of Posidonia oceanica using Aerial Photographs and Side Scan Sonar: Application off the Island of Corsica (France). Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol. 47, n°3, p. 359-367.

Piazzi L., Acunto S. et Cinelli F. (2000). Mapping of Posidonia oceanica beds around Elba Island (western Mediterranean) with integration of direct and indirect methods. Oceanologica Acta, Vol. 23, Issue 3, p. 339-346.

Piel S. (2004). Structuration des données issues du programme REBENT au sein d'une géodatabase (échantillons de données représentatifs utilisés en milieu subtidal : l'archipel des Glénan (29) et en milieu intertidal : les traicts du Croisic (44). Mini-projet SIG, IFREMER DEL/AO - DESS SIGMA (Science de l'Information Géoréférencée pour la Maîtrise de l'environnement et l'Aménagement des territoires).

Pinn E.H., Robertson M.R., Shand C.W. et Armstrong F. (1998). Broad-scale benthic community analysis in the Greater Minch Area (Scottish west coast) using remote and nondestructive techniques. Int. J. Remote Sensing, Vol. 19, n°16, p. 3039-3054.

Pinn E.H. et Robertson M.R. (1998). The effect of bioturbation on RoxAnn registered , a remote acoustic seabed discrimination system. J. Mar. Biol. Assoc. UK.,vol. 78, n°3, p. 707-715.

Pinot, J.P. (1974). Le précontinent Breton entre Penmarc'h, Belle-Île et l'escarpement continental. Etude géomorphologique. Thèse d'état, UBO, 256 p.

Provencher L., Giguere M. et Gagnon P. (1997). Seabed characteristics between the 10 and 50 meter isobaths around the Magdalen Islands measured by hydro-acoustics and sediment sampling. Evaluation of acoustic RoxAnn USP system. Ministère des Pêches et des Océans, Mont-Joli, Canada, Dir. Sci., 49 pp.

Roberts H.H., Phipps C.V. et Effendi, L.L. (1987). Morphology of large Halimeda bioherms, eastern Java Sea (Indonesia): A sidescan sonar study. Geo. Mar.. Lett., vol. 7, n°1, p. 7-14.

Robinson C.L.K., Hay D.E., Booth J. and Truscott J. (1996). Standard methods for sampling resources and habitats in coastal subtidal regions of British Columbia: Part 2. Review of sampling with preliminary recommendations. Can. Tech..Rep..Fish. Aquat. Sci., 119 p.

Rollet C., Ehrhold A., Guillaumont B. et Hamon D. (2004). Le SIG, élément clé pour la cartographie des habitats marins. Actes du colloque Géoévènement, Mars 2004, Paris, à paraître.

Ropert M. et Dauvin J.C. (2000). Renewal and accumulation of a *Lanice conchilega* (Pallas) population in the baie des Veys, western Bay of Seine. Oceanologica Acta, Volume 23, Issue 4, 1, p. 529-546.

Rosenberg, R., Nilsson, H.C., Hollertz, K. & Hellman, B., 1997. Density-dependent migration in an *Amphiura filiformis* (Amphiuridae, Echinodermata) infaunal population. Marine Ecology Progress Series, 159, p. 121-131.

Sauriau P.G., Pichocki-Seyfried C., Walker P., De Montaudouin X., Palud C. et Héral M. (1998). *Crepidula fornicata L.* (mollusque, gastéropode) en baie de Marennes-Oléron : cartographie des fonds par sonar ˆ balayage latéral et estimation du stock. Oceanologica Acta, vol. 21, n°2, p. 353-362.

Schlagentweit G.E.O. (1993). Real-time Acoustic Bottom Classification for Hydrography. A field Evaluation of RoxAnn. Lighthouse : edition 47, Spring 1993, 9-14.

Service M. (1998). Monitoring benthic habitats in a Marine Nature Reserve (1998). Journal of Shellfish-Research, 17, (5), p. 1487-1489.

Siakavara A. et Lazaridou E. (2000). Mapping of Posidonia oceanica beds in Strymonikos and Ierissos gulfs. 6. Hellenic Symp. on Oceanography and Fisheries, Chios (Greece), 23-26 May 2000, NCMR Association of Employees, vol. 1, p. 361-365.

Siljestroem P.A., Rey J. et Moreno A. (1996). Characterization of phanerogam communities (Posidonia oceanica and Cymodocea nodosa) using sidescan sonar images. Photogrammetry & Remote Sensing, vol. 51, n°6, p. 308-315.

Smith G.F., Bruce D.G. et Roach E.B. (2001). Remote Acoustic Habitat Assessment Techniques Used to Characterize the Quality and Extent of Oyster Bottom in the Chesapeake Bay. Marine Geodesy, vol. 24, n°3, p. 171-189.

Sorensen P.S., Madsen K.N., Nielsen A.A., Schultz N. et Conradsen K. (1998). Mapping of the benthic communities Common mussel and Neptune grass by use of hydroacoustic measurements. Third European marine science and technology conference MAST, Lisbon, 23-27 May 1998, Session report Seafloor characterisation, Ollier G. (ed.), Cochonat P. (ed.), Mendes Victor L. (ed.), Luxembourg, Luxembourg European Commission DG-12 Science, Research and Development, 1999, p. 101-110.

Sorensen P.S. (1999). Spatial distribution maps for benthic communities : A study of common mussels (Mytilus edulis), neptune grass (Posidonia oceanica), and Cymodocea nodosa based on hydroacoustic measurements. Ph D thesis, Technical University of Denmark, 177 p.

Sotheran I.S., Foster-Smith R.L. et Davies J. (1995). Mapping of marine benthic habitats using image processing techniques within a raster-based geographic information system. Proc. 25. Ann. Symp. of ECSA. Part 3, Dublin (Ireland), 11-16 Sep 1995, Science for Management in coastal and estuarine waters, eds. 1997, vol. 44, Suppl. A, p. 25-31.

Starr R., Steger J., Greene H.G. & Schwing F. (1997). Mapping Benthic Habitats and Ocean Currents in the Vicinity of Central California's Big Creek Ecological Reserve. Rapport NOAA-TM-NMFS-SWFSC-245, 70 p.

Vaslet D., Larsonneur C. et Auffret J.P. (1978). Carte des dépôts superficiels de la Manche au 1/400 000. Notice BRGM éd., Orléans.

Documents et Fiches techniques du projet REBENT mises en ligne sur le site REBENT (http://www.ifremer.fr/rebent/).