







INTERREGIIIB Posidonia

MISE EN COHERENCE, DEVELOPPEMENT, HARMONISATION ET VALIDATION DE METHODES D'EVALUATION DE LA QUALITE DU MILIEU LITTORAL PAR LE SUIVI DE L'HERBIER DE POSIDONIA **OCEANICA**

RAPPORT FINAL D'ACTIVITE DU GROUPE DE TRAVAIL « CARTOGRAPHIE »

















consultant : Philippe Clabaut

Sommaire

| 1 | IN' | FRODUCTION | 3 |
|----|--|--|---------------------------------|
| 2 | LE | S GRANDES ETAPES DU TRAVAIL DU GROUPE CARTOGRAPHIE | 9 |
| | 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7 2.8 | SEMINAIRE DE LANCEMENT DE MARSEILLE (12-13 JUILLET 2005) | 10 RE 2005 12 13 13 |
| 3 | DE | SCRIPTION ET PRINCIPES DES DIFFERENTES FILIERES D'ACQUISITION | N15 |
| | 3.1 3.2 3.3 3.4 | ACOUSTIQUE VIDEO REMORQUEE DONNEES DE TELEDETECTION OBSERVATIONS EN PLONGEE SOUS-MARINE | 19 23 |
| 4 | SIT 34 | TES ATELIERS : APPLICATION DES TECHNIQUES ET PROTOCOLES RETEN | US |
| | 4.1 4.2 | SITE ATELIER DE ST RAPHAËL SITE ATELIER D'IMPERIA | |
| 5 | SY | NTHESE DES FILIERES LACUNES, LIMITES, COMPLEMENTARITES | 37 |
| | 5.2 Di 5.3 SY | ONNEES DE TELEDETECTION ETECTION ACOUSTIQUE VS. OBSERVATIONS VISUELLES YNTHESE DES INFORMATIONS RELATIVES A LA MISE EN ŒUVRE DES DIFFERENTES TECHN RTOGRAPHIE | 41 NIQUES |
| 6 | ST | ANDARDISATION DE LA NOMENCLATURE ET DE LA CHARTE GRAPHIÇ |)UE.51 |
| | 6.1 6.2 | NOMENCLATURE | 52 |
| 7 | SY | NTHESE ET RECOMMANDATIONS AUX GESTIONNAIRES | 58 |
| 8 | CO | NCLUSIONS | 60 |
| 9 | BII | BLIOGRAPHIE | 61 |
| 14 |) I | ISTE DES ANNEXES | 68 |

1 Introduction

Les hommes ont utilisé des cartes depuis la plus lointaine Antiquité, vraisemblablement avant même l'invention de l'écriture. Certains dessins sur les grottes préhistoriques pourraient bien constituer des croquis de leurs territoires. La plus ancienne carte que l'on ait retrouvée jusqu'à présent, est une plaque de terre cuite provenant de Mésopotamie; on suppose qu'elle fut composée vers l'an 2500 av. J.C.et représente une vallée le long d'un fleuve. Dès le Vème siècle avant notre ère, en Extrême Orient, on retrouve des mappemondes circulaires et au XIIème siècle, le géographe explorateur arabe Al-Idrisi, reprenant les travaux des Grecs et de Ptolémée, établit une carte du monde qui constitue la somme des savoirs géographiques de son temps.

L'âge d'or de la cartographie coïncide avec l'invention d'instruments de mesure performants (lunettes astronomiques, chronomètre et baromètre); il devient enfin possible de mesurer les angles, de déterminer les latitudes et longitudes et de mesurer les altitudes avec exactitude. Les nouveaux cartographes ne sont plus des explorateurs mais des mathématiciens et des astronomes. C'est à cette époque que sont inventées les différentes projections permettant de représenter la Terre dans sa globalité sur un plan en deux dimensions (Mercator). Le recours à la projection de Mercator, permettait le tracé de cartes planes sur lesquelles les marins pouvaient signaliser une route rectiligne malgré la sphéricité de la terre. C'est aux Pays-Bas que l'on retrouve les cartographes les plus brillants d'Europe, et parmi eux,

Hondius, Janszoon et Blaeu sont les signatures les plus célèbres (Fig. 1).



Figure 1: William Janszoon. "Theatrum orbis terrarum, sive atlas novus. Pars secunda". Amsterdami: Apud Ioh. & Cornelium Blaeu, (1640).

L'emploi généralisé de la boussole et de l'astrolabe au XIIIème siècle va permettre d'établir les premières cartes nautiques : les « portulans ». Elles décrivaient précisément les côtes, plus schématiquement l'intérieur des terres. Le calcul des arcs méridiens, les thèses de Newton sur l'aplatissement des pôles et les progrès de la trigonométrie contribuent à une précision accrue des cartes. Au XIXème siècle on commença ainsi à développer, non plus des atlas universels, mais des outils plus spécialisés telles les cartes thématiques, toujours plus riches en informations. Le XXème siècle avec l'apport de la photographie aérienne puis la télédétection par satellite, paracheva l'œuvre de 25 siècles de recherche.

De nombreuses disciplines contribuent à l'enrichissement et à la précision de la cartographie : astronomie, minéralogie, climatologie, hydrographie, sciences sociales. Mais au-delà d'être une compilation de données hétéroclites provenant de différents domaines, le rôle de la cartographie est justement d'établir des liens entre les différents champs d'étude. Les cartes constituent alors le point de convergence des connaissances sur un secteur donné, elles restent à ce jour un des supports privilégiés dans la plupart des disciplines scientifiques.

En Méditerranée française, les premières cartes sur lesquelles apparaissent les biocénoses marines sont celles de Marion (1883) et de Pruvot (1894). Il s'agit de cartes à très petite échelle et la méthode utilisée, peu explicitée, est sans doute largement empirique. Depuis, des centaines de cartes ont été produites, la plupart n'ayant pas été publiées (littérature grise). La nécessité de cartographier les herbiers à Posidonia oceanica s'est progressivement imposée à partir des années 1950s, lorsque les chercheurs ont pris conscience de son rôle écologique dans les équilibres littoraux, puis lorsque les gestionnaires des espaces littoraux ont pris conscience de son importance économique (Molinier, 1954; Meinesz et al., 1981; Boudouresque & Meinesz, 1982). Les cartes réalisées répondent ainsi à trois objectifs : (i) améliorer les connaissances sur la répartition de la végétation (localisation, abondance, distribution en fonction de la profondeur, succession des stades pionniers au climax); (ii) protéger les herbiers en tant qu'espèce d'importance patrimoniale en constituant des outils d'aide à la décision en matière de gestion de la zone côtière (localisation des espèces protégées, des zones de sensibilité écologique) et d'aménagement du littoral (extensions portuaires, rejets urbains, etc.; Charbonnel et al., 1995; Pasqualini et al., 1999, 2000; Bernard et al., 2003a); (iii) permettre le suivi à long terme des évolutions de la végétation et plus particulièrement de l'herbier de posidonie en tant que bio-indicateur.

Les techniques de cartographie et la précision des restitutions ont rapidement évolué. On peut distinguer les techniques donnant accès à des données discrètes (échantillonnage de points distincts régulièrement répartis dans une zone d'étude) de celles permettant de restituer des informations continues (couvertures surfaciques complètes sur des portions des secteurs d'étude ou le long de parcours).

Parmi les premières on peut citer le fil à plomb enduit de poix (utilisé notamment pour les premières cartes marines et abandonné depuis), les dragages, les bennes, les observations visuelles ou photographies en plongée sous-marine. La précision des données obtenues dépend alors de la taille des mailles de l'échantillonnage (Bellan-Santini, 1964; Picard, 1965; Augier & Boudouresque, 1976; Meinesz & Laurent, 1980, 1982; Clarisse, 1984; Meinesz & Lefèvre, 1984; Bianconi *et al.*, 1987; Meinesz *et al.*, 1987; Bellone & Meinesz, 1995; Loquès *et al.*, 1995; Piazzi *et al.*, 1996; Meinesz *et al.*, 1998, 1999, 2001). De nombreuses cartes à grande échelle d'herbiers superficiels ont été établies en apnée, parfois en plongée, à partir de simples repères visuels (Molinier & Picard, 1952, 1953; Molinier, 1960; Astier, 1972). Bien qu'imprécises, ces cartes ont permis de jeter les bases du corpus des connaissances actuelles sur le rôle et la dynamique des herbiers. Aujourd'hui, les techniques dites « destructives » prélèvements par dragues ou bennes sont interdites partout où *P. oceanica* est protégée.

Les techniques permettant l'acquisition de données continues sont essentiellement les photographies aériennes et les images satellitaires, la radiospectrométrie (CASI), le sonar latéral ou encore le parcours de transects en vidéo remorquée (e.g. Cuvelier, 1976; Cristiani, 1980; Calvo & Fradà Orestano, 1984; Gloux, 1984; Fredj *et al.*, 1990; Paillard *et al.*, 1993; Pasqualini, 1997; Jaubert *et al.*, 1999; Belsher & Houlgatte, 2000; Pérez-Blaya *et al.*, 2000; Bonhomme *et al.*, 2003). La restitution des contours de la végétation est alors très précise, toutefois, des doutes subsistent quand à l'interprétation des images ou sonogrammes, des observations en plongée ou en apnée sont alors nécessaires au titre des vérités-terrain.

Les premières photographies aériennes utilisées n'étaient généralement pas corrigées (clichés parfois obliques, erreurs de parallaxe, etc.) et, en l'absence de GPS, le positionnement des plongeurs était approximatif (Blanc & Jeudy de Grissac, 1978 ; Augier & Boudouresque,1967 ; 1970a ; 1970b ; 1976 ; Blanpied *et al.*, 1979 ; Augier *et al.*, 1984 ; Ramos-Espla, 1984). Depuis, pour les herbiers superficiels (10-20 m selon la transparence de l'eau), les photographies aériennes, couplées aux outils modernes de correction d'image, de traitement d'image et de positionnement des vérités-terrain, constituent l'essentiel des techniques employées (Meinesz *et al.*, 1981 ; Pasqualini, 1997 ; Boudouresque *et al.*, 2000 ;

Charbonnel *et al.*, 2000 ; Pergent-Martini & Pasqualini, 2000 ; Leriche-Guichard, 2001). Un protocole très précis destiné à optimiser les prises de vue a été développé (Lefèvre *et al.*, 1984 ; McKenzie et al., 2001).

Pour la cartographie des herbiers profonds, l'utilisation du sonar latéral a représenté une avancée majeure (Cuvelier, 1976; Cristiani, 1980; Meinesz et al., 1981; Colantoni et al., 1982; Gloux, 1984; Cinelli et al., 1992; Bianchi & Peirano, 1995; Paillard et al., 1993; Pasqualini, 1997; Pasqualini et al., 1997, 2000; Denis et al., 2001; Diviacco et al., 2001). Jusqu'à récemment (Bernard et al., 2003b) son utilisation était limitée aux zones les plus profondes de l'herbier (Meinesz et al., 1981). Le sonar latéral est adapté à la cartographie à toutes les échelles et sa précision est remarquable, s'il est couplé à des vérités-terrain. Celles-ci peuvent être réalisées en plongée sous-marine : quadrillage par des filins, parcours de transects, éventuellement en scooter sous-marin, l'utilisation d'un ROV ou de caméra tractée par un navire (Meinesz & Lefèvre, 1984; Boudouresque et al., 1985b; Pergent & Pergent, 1985; Pergent et al., 1985, 1991 Meinesz et al., 1981; Meinesz & Simonian, 1983; Niéri, 1983; Augier et al., 1984; Ramos-Espla, 1984; Meinesz et al., 1988a; Charbonnel et al., 1996; Belsher & Houlgatte, 2000; Piazzi et al., 2000; Denis et al., 2001).

Quelques autres méthodes ont été explorées, qui s'apparentent à l'une ou l'autre des méthodes citées plus haut, parmi lesquelles il convient de mentionner la sismique réflexion à haute résolution, l'imagerie multispectrale aéroportée. Enfin, l'imagerie satellitaire qui n'a pour le moment donné que des résultats assez décevants en raison de sa faible pénétration dans l'eau, va être amenée à rapidement se développer avec la mise à disposition progressive d'images à très haute résolution, inférieure à 1 m. (Belsher *et al.*, 1985, 1988; Hoareau, 1988; Meinesz *et al.*, 1991; Paillard *et al.*, 1993). Le traitement des données fait appel à des méthodes très diverses allant de l'outil de géostatistique (Kriging, Francour & Marchadour, 1989; Pergent, 1990) au logiciel de traitement d'image (Pasqualini & Pergent-Martini, 1996).

Au total, la cartographie des herbiers à *Posidonia oceanica* de Méditerranée apparaît comme extrêmement hétérogène, tant au niveau géographique que pour ce qui concerne la précision minimale requise aujourd'hui pour la gestion des espaces littoraux (Tab. 1). Le long de la plus grande partie des 46 000 km de côtes de la Méditerranée *sensu lato*, il n'existe aucune carte. Dans un certain nombre de régions (par exemple le Var, les Bouches-du-Rhône, la Communitat Valenciana, les Baléares, la Tunisie), il existe des cartes anciennes, certes imprécises et peut-être périmées du fait de la régression des herbiers, mais qui ont le mérite d'exister. Elles restent toutefois, le plus souvent quantitatives : elles indiquent la présence ou l'absence d'herbier, éventuellement les herbiers dégradés et les mattes mortes. Enfin, les cartes répondant aux critères actuels de précision (résolutions, nomenclatures, bathymétrie) représentent environ 10 % du littoral, essentiellement en Méditerranée occidentale.

Tableau 1 : Exemples de cartes de la végétation marine, dont l'herbier à Posidonia oceanica, réalisées en Méditerranée. Tableau d'après Boudouresque et al., 2006.

| Localité ou région | Echelle | Méthodes | Espèces ou communautés | Référence |
|-------------------------------|-----------|--|------------------------|------------------------------------|
| Golfe du Lion | 1/460 000 | Benne | Divers | Pruvot (1897) |
| Corse | 1/250 000 | Photographies aériennes, Sonar latéral | Posidonia oceanica | Pasqualini (1997) |
| Provence (France) | 1/225 000 | Benne | Divers | Marion (1883) |
| Baie de Monastir (Tunisie) | 1/154 000 | Apnée, plongée | Divers | El Asmi-Djellouli et al. (2000) |

| Provence (France) | 1/125 000 to 1/4 000 | Photos, plongée | Posidonia oceanica | Blanc (1975) |
|--|-------------------------|--|---|-----------------------------------|
| Bahía de Alicante (Espagne) | 1/115 380 | Photographies aériennes, plongée | Posidonia oceanica | Ramos Esplá (1984) |
| Baie de Marseille (Provence, France) | 1/72 000 | Benne | Divers | Picard (1965) |
| Côte Bleue (Provence, France) | 1/50 000 | Photographies aériennes, plongée | Posidonia oceanica | Bernard <i>et a</i> l. (2000) |
| Rade d'Hyères (France) | 1/50 000 | Sonar latéral | Posidonia oceanica | Paillard <i>et al.</i> (1993) |
| Côte Bleue, Marseille (France) | 1/36 360 | Photographies aériennes, sonar latéral, plongée, caméra remorquée | Posidonia oceanica | Bonhomme <i>et a</i> l. (2003) |
| Méditerranée française | 1/33 300 to 1/5 000 | Plongée, apnée | Posidonia oceanica | Molinier & Picard (1952) |
| Stagnone, Sicile (Italie) | 1/31 250 | Photographies aériennes | Posidonia oceanica | Calvo & Fradà Orestano (1984) |
| Ligurie (Italie) | 1/25 000 | Divers | Posidonia, Cymodocea nodosa | Bianchi & Peirano (1995) |
| Montecristo, Gorgona, Giannutri, Capraia, Grosseto, Giglio, Toscane, Italie | 1/25 000 | Sonar latéral, Remotely Operated Vehicle avec camera, plongée | Posidonia oceanica, Cymodocea nodosa | Cinelli <i>et al.</i> (1992) |
| Baie de Porto Conte, Alghero (Ouest Sardaigne) | 1/20 000 | Imagerie satellite, plongée | Posidonia oceanica | Fredj <i>et al.</i> (1990) |
| lle de Porquerolles (France) | 1/15 000 | Imagerie satellite, plongée | Posidonia oceanica | Meinesz <i>et al.</i> (1991) |
| Golfe Juan & iles de Lérins (France) | 1/10 714 | Sous-marin | Posidonia oceanica | Meinesz & Laurent (1982) |
| Rade de Toulon & Giens (France) | 1/10 000 | Photographies aériennes, sonar latéral, plongée | Divers | Paillard <i>et al.</i> (1993) |
| Golfe de San Fiurenzu, Corse | 1/10 000 | Photographies aériennes | Posidonia oceanica | Pasqualini (1997) |
| Côte d'Azur (France) | 1/9 375 | Sous-marin | Posidonia oceanica | Meinesz & Laurent(1980) |
| Baie de Elbo, Réserve naturelle de Scandola, Corse | 1/9 090 | Plongée | Divers | Meinesz <i>et al.</i> (1998) |
| Iles de Ischia & Procida, Golfe de Naples (Italie) | 1/8 000 | Sonar latéral, plongée | Posidonia oceanica | Colantoni <i>et al.</i> (1982) |
| Baie de Elbo, Réserve naturelle de Scandola, Corse | 1/7 810 | Plongée | Posidonia oceanica | Meinesz <i>et al.</i> (1987) |
| Menton à Cap d'Ail (Côte d'Azur, France) | 1/7 500 | Photographies aériennes Sonar latéral, | Divers, incl. <i>Caulerpa</i> | Belsher & Houlgatte (2000) |

| | | camera remorquée | taxifolia | |
|--|---------|---|---|------------------------------------|
| Juan-les-Pins à Golfe Juan, (Côte d'Azur, France) | 1/5 000 | Photographies aériennes, plongée | Phanérogames marines | Meinesz & Simonian (1983) |
| Ile de Port-Cros (France) | 1/5 000 | Photographies aériennes, apnée, plongée | Divers | Augier & Boudouresque (1970) |
| lle de Porquerolles (France) | 1/5 000 | Photographies aériennes, sonar latéral, camera remorquée, plongée | Divers | Bernard <i>et al.</i> (2003a) |
| Baie de La Ciotat, Marseille, (France) | 1/5 000 | Photographies aériennes, sonar latéral, camera remorquée, benne, plongée | Divers | Bernard <i>et al.</i> (2003b) |
| Plateau des chèvres, Marseille (France) | 1/5 000 | Photographies aériennes, plongée | Posidonia oceanica | Pergent-Martini & Pergent (1990) |
| Côte Bleue (France) | 1/5 000 | Sonar latéral | Posidonia oceanica | Cristiani (1980) |
| lle de Port-Cros (France) | 1/4 762 | Apnée | Divers | Augier & Boudouresque (1976) |
| S Leghorn, Toscane (Italie) | 1/3 330 | Plongée | Posidonia oceanica | Piazzi <i>et al.</i> (1996) |
| Côte Bleue (France) | 1/2 600 | Photographies aériennes, sonar latéral | Posidonia oceanica | Niéri <i>et al.</i> (1991) |
| Banyuls-sur-Mer (Catalogne française) | 1/2 310 | Plongée | Posidonia oceanica, Zostera noltii | Pergent <i>et al.</i> (1991) |
| Golfe de San Fiurenzu Corse | 1/2 000 | Photographies aériennes, plongée | Posidonia oceanica | Boudouresque et al. (1985b) |
| Villefranche (France) | 1/1 333 | Plongée | Posidonia oceanica | Meinesz & Lefèvre (1984) |
| lle de Port-Cros (France) | 1/1 250 | Photographies aériennes apnée | Divers | Augier & Boudouresque (1967 |
| Grotte de Elbu, Réserve naturelle de Scandola, Corse | 1/1 190 | Photographies aériennes, plongée | Divers | Meinesz <i>et al.</i> (1988) |
| Baie de Menton (France) | 1/1 150 | CASI | Posidonia oceanica, Caulerpa taxifolia | Jaubert <i>et al.</i> (1999) |
| lle de Port-Cros (France) | 1/1 100 | Plongée | Posidonia oceanica | Bellone & Meinesz (1995) |
| Urla-Iskele, Golfe d'Izmir (Turquie) | 1/1 000 | Plongée | Posidonia oceanica | Pergent & Pergent (1985) |
| Ile de Port-Cros (France) | 1/488 | Photographies aériennes, plongée | Divers | Augier & Niéri (1988) |
| Ile de Port-Cros (France) | 1/455 | Plongée | Posidonia | Loquès <i>et a</i> l. |

| | | | oceanica, Pinna nobilis | (1995) |
|---------------------------------|-------|---------|----------------------------|---------------|
| lle de Porquerolles (France) | 1/320 | Plongée | Divers | Augier (1995) |

La cartographie fait partie intégrante de la panoplie des outils opérationnels d'aide à la décision en matière de gestion des zones côtières. L'objectif des collectivités territoriales est de pouvoir disposer, de manière aussi exhaustive, rapide et précise que possible, d'un ensemble de données afin de pouvoir prétendre gérer de façon globale les ressources patrimoniales de leur espace côtier. A l'heure où l'on perçoit la nécessité d'une gestion globale des problèmes environnementaux à l'échelle du bassin Méditerranéen, où la notion d'aires marines protégées (AMP) devient une priorité, la nécessité de disposer d'outils communs, ainsi que de banques de données aisément consultables - tant par les scientifiques que par les décideurs - apparaît primordiale. Cet aspect rejoint d'ailleurs les objectifs affichés, puisque dans le paragraphe consacré à la cohérence du projet avec les politiques publiques, il a été mentionné qu'il s'intégrait dans le Schéma de Développement de l'Espace Communautaire (SDEC) à deux niveaux, celui de la politique de l'environnement et celui de l'aménagement durable des zones côtières.

Objectifs et composition du groupe de travail Cartographie

L'objectif du groupe de travail est, à partir d'une démarche collective, de générer en cartographie une séquence logique d'utilisation d'outils, de logiciels de traitement de données, permettant de créer une banque de données à partir de laquelle pourront être obtenus des produits homogènes, comparables et intégrables pour toutes les régions concernées.

Il consiste donc à partager, entre les partenaires impliqués, les expériences respectives en matière de cartographie de l'herbier à *Posidonia oceanica*, en vue d'en harmoniser les méthodes.

Il s'inscrit dans une démarche complémentaire de suivi à long terme du milieu côtier et de gestion des eaux, en répondant – notamment – aux besoins de la Directive Cadre Eau (DCE) et de la Directive Habitats.

Aussi bien en région PACA, Ligurie, que Catalogne, des cartographies des biocénoses ont été réalisées à l'occasion d'études patrimoniales ou d'impact, sur demandes de gestionnaires ou de privés, ou bien encore à l'initiative de certains chercheurs. Elles ont été réalisées par exemple pour évaluer l'impact d'actions anthropiques (rejets urbains, extensions portuaires...) ou suite à des inquiétudes suscitées par l'expansion de l'algue invasive *Caulerpa taxifolia*. Dans ce cadre, l'importance et la place de l'herbier de Posidonie, l'ont placé au premier rang des thématiques étudiées et cartographiées en Méditerranée. Mais les données obtenues, avec des moyens et des méthodes différentes, sont souvent hétéroclites et non comparables. Enfin, elles sont rarement disponibles en ligne.

Dans ce sens, les actions du groupe de travail Cartographie consisteront à mettre en commun des expériences, des données, des méthodes afin d'aboutir à :

- la validation des méthodes et des techniques de cartographie ;
- une standardisation permettant une harmonisation des produits cartographiques de sortie (en particulier au niveau des nomenclatures, des chartes graphiques et des échelles);
- l'aide à la définition d'une banque de données des outils cartographiques applicables à l'ensemble de la Méditerranée.

Enfin, l'implication des gestionnaires dans le groupe de travail Cartographie a permis d'élaborer un document directement exploitable en terme décisionnel (choix de techniques en fonction des priorités affichées).

Partenaires du groupe de travail Cartographie

Les partenaires du groupe de travail Cartographie sont :

- Pour la coordination, le GIS Posidonie en collaboration avec l'Ifremer en charge notamment de l'organisation des campagnes océanographiques et de la planification des réunions de travail
- la région PACA (Provence Alpes Côte d'Azur), le laboratoire EqEL de l'Université de Corse, l'ARPAL (Agenzia Regionale Protezione Ambiente Ligure), et l'ENEA (Ente per le nuove tecnologie, l'energia e l'ambiente), intervenant en tant qu'experts ou gestionnaires (décideurs) dans le groupe de travail.

2 Les grandes étapes du travail du groupe cartographie

2.1 Séminaire de lancement de Marseille (12-13 juillet 2005)

Le séminaire de démarrage du programme Posidonia a eu lieu à Marseile les 12 et 13 juillet 2005. Il avait pour objectifs :

- La présentation de l'ensemble des participants
- Le rappel des objectifs du programme et de ceux de chaque groupe de travail,
- L'expression des attentes de chacun dans le cadre de ce programme.

Le GIS Posidonie et l'Ifremer ont plus particulièrement animé les discussions relatives au groupe de travail Cartographie.

Les partenaires directement impliqués dans le GT2 Cartographie sont :

- L'Ifremer associé au GIS Posidonie, qui coordonnent ce groupe de travail
- L'ARPAL
- L'ENEA
- La région PACA
- Les sous-traitants : OLPA, BMC studio, P. Clabaut et Vision du Ciel
- La DIREN Languedoc-Roussillon a participé au séminaire en tant qu'invitée.

Cinq points en particulier ont été abordés au cours de ce séminaire de lancement :

1- Un recensement des méthodes de cartographie employées par les différents partenaires a été dressé. Le document le plus complet existant à cette époque était le guide méthodologique réalisé par l'Ifremer et le GIS Posidonie lors de la campagne "Posicart" (Denis et al., 2003). Il n'existait pas de guide méthodologique italien. Une méthodologie de micro-cartographie en plongée à partir d'un système appelé GIB (GPS Intelligent Buoys), fournissant la position précise d'un émetteur immergé (plongeur équipé d'un "pinger") à l'aide

d'une triangulation de bouées de surface, technique maîtrisée par ENEA, a été présentée par A. Peirano.

- 2- Les besoins des gestionnaires en terme de cartographie ont été évalués à l'occasion d'un tour de table. Les besoins affichés étaient de deux types : (i) une cartographie générale de l'herbier à petite échelle (1/25 000 par exemple) sur l'ensemble d'un département, facilement consultable, qui permet de visualiser rapidement la présence ou l'absence de Posidonie. (ii) Au niveau des communes, une cartographie précise, à grande échelle, est nécessaire par exemple pour les besoins des aménagements littoraux (études d'impacts...) ou encore dans le cadre des zones marines « Natura 2000 » (les échelles aux 1/5 000 et 1/1 000 sont les plus fréquemment citées).
- 3- Le choix de la méthodologie à appliquer dans les sites ateliers n'avait pas encore été arrêté lors de ce séminaire. Il a été demandé aux partenaires de réfléchir aux méthodologies qu'ils souhaitaient employer et de préciser leur niveau d'implication. La validation des différentes filières d'acquisition (vérités-terrain, définition de gamme d'erreur d'interprétation) était apparue, dès le début du programme, comme prioritaire. Il avait été décidé de définir la méthodologie à appliquer sur les sites ateliers pour la réunion d'octobre 2005 du groupe de travail Cartographie.
- 4- Choix des sites ateliers : deux sites avaient été retenus, de manière à bénéficier d'une plus grande richesse en faciès d'herbiers de posidonie, sources d'erreur et de différence dans l'interprétation des sonogrammes ou des photographies aériennes par exemple :
- <u>- en région Ligure</u> : le site d'Imperia a été retenu car il présentait l'intérêt d'être bien connu, avec de nombreuses données, notamment une couverture sonar latéral récente, ce qui en faisait un site de prédilection pour des comparaisons méthodologiques ;
- en région PACA: le site de St Raphaël a été choisi pour répondre à la demande du Service Mer de la Région PACA; il n'existait pas, en effet, de cartographies récentes de ce secteur, et la Région PACA souhaitait combler cette lacune. Dans la mesure où il n'y avait pas de relevés sonar disponibles pour cette zone, l'Ifremer et le GIS Posidonie avaient prévu de mettre en place dans le cadre du programme POSIDONIA une campagne de relevés au sonar latéral de tout ce secteur
- Il a été prévu que les méthodologies appliquées sur chacun de ces deux sites devait tenir compte des niveaux de connaissances existants sur les deux sites.
- 5- Un planning des réunions de travail, des campagnes de terrain et des rendus des différents rapports a été arrêté à l'issue du séminaire.

Le compte-rendu détaillé de ce séminaire de lancement, ainsi que les présentations des différents partenaires sont détaillés en **Annexe GTcarto1a**.

2.2 Réunion de travail de Gênes (20 octobre 2005)

Cette réunion du groupe de travail a eu lieu environ trois mois après le séminaire de lancement et a eu pour objectifs de :

- présenter les outils de cartographie et les méthodes utilisés par les différents partenaires pour cartographier l'herbier à *P. oceanica*
- organiser des campagnes océanographiques sur les sites atelier de Saint Raphaël (PACA) et d'Imperia (Ligurie).

Cette réunion a réuni les principaux partenaires du groupe de travail Cartographie et d'autres représentants ligures.

Cette réunion s'est déroulée en plusieurs étapes :

?? Présentation des techniques et méthodes utilisées par les partenaires en matière de cartographie de l'herbier de Posidonie, par le GIS Posidonie; présentation de la vidéo remorquée par l'Ifremer et présentation de la méthodologie de cartographie des herbiers en région Ligure.

Le guide méthodologique de cartographie des biocénoses benthiques a servi de point de départ et de fil directeur pour la mise en place des campagnes. Ce guide développe tout particulièrement les aspects relatifs à :

- la description des caractéristiques générales de l'herbier,
- l'état de l'art en matière de cartographie de l'herbier,
- la stratégie adoptée pour conduire à la cartographie de l'herbier,
- les moyens et les données nécessaires à la cartographie de l'herbier,
- l'élaboration du SIG et des cartes proprement dites,
- les droits d'usage des données et les éléments d'un cahier des charges pour la cartographie de l'herbier de Posidonie.
- ?? Discussions et programmation des campagnes sur les sites atelier de Saint Raphaël et d'Imperia. La coordination de la logistique des moyens humains et matériels ainsi que la cohérence des techniques cartographiques retenues pour les sites atelier ont été discutées.

L'emprise géographique du site atelier de St Raphaël a été définie et arrêtée précisément. Les méthodes et les techniques utilisées pour acquérir l'information cartographique, ainsi que la logistique matérielle et humaine, ont également été définies. L'ensemble des filières d'acquisition (sonar, vidéo positionnement, photographies aériennes, plongée sous-marines) ont été discutées.. En ce qui concerne la vidéo remorquée, les systèmes utilisés par l'Ifremer (PRISME / MOBIDIC), et une technique de micro cartographie en plongée à l'aide d'un GIB (GPS Intelligent Buoys : système permettant de localiser précisément en 3D la position d'un plongeur) utilisée par l'ENEA, ont été retenues. Dans ce dernier système, le plongeur est situé au sein d'un ensemble de 4 bouées flottantes, ellesmême localisées précisément par GPS différentiel. La précision submétrique du positionnement de cette technique devrait permettre de valider la précision des positionnements des différentes filières d'acquisition (sonar, vidéo tractée, photo aérienne, plongée...).

Le secteur de travail et les dates d'intervention ont été définis pour le **site atelier d'Imperia**. Les techniques retenues comprennent les photographies aériennes et des relevés au sonar latéral, en vue de compléter les secteurs déjà renseignés, ainsi que des verités-terrain en vidéo remorquée et en plongée à l'aide du GIB.

L'homogénéité des méthodes et techniques envisagées par les différentes équipes et sur les deux sites ateliers témoigne d'une bonne appréciation des besoins en termes de cartographie, a favorisé l'harmonisation des résultats restitués pour les deux sites.

?? Bancarisation des données

A. Peirano (ENEA) a présenté le site internet structuré en banque de données. Il se proposait d'accueillir, suivant les desiderata de chacun, aussi bien toutes les données que les produits finis. A ce sujet, la question de l'appartenance des données et des autorisations pour leur utilisation, a été posée (**Annexe GTcarto2**).

Un lien entre cette banque de données et le site officiel du programme POSIDONIA (www.ifremer.fr/posidonia/) a été établi.

2.3 Mission POSIDONIA 1 : site atelier de St Raphaël. 27 novembre-01 décembre 2005

Les objectifs de la campagne de terrain sur le site atelier de St Raphaël ont concerné :

- La mise en œuvre de l'ensemble des techniques et méthodes utilisées par différents partenaires (français et italiens) pour la cartographie de l'herbier.
- L'initiation des transferts de compétence, des échanges et l'établissement des comparaisons techniques et méthodologiques.
- à la détermination d'une séquence logique d'utilisation d'outils, de logiciels de traitement de données permettant d'obtenir des produits homogènes comparables et intégrables par toutes les régions concernées, et répondant aux besoins des décideurs et des gestionnaires à l'échelle de la Méditerranée.

La mise en place de ces techniques sur le site de St Raphaël répondait également à la demande du Service Mer de la Région PACA qui souhaitait combler le manque de données cartographiques sur ce secteur. L'Ifremer et le GIS Posidonie ont organisé cette mission et effectué sa coordination technique (**Annexe GTcarto3**).

2.4 Mission POSIDONIA 2 : site atelier d'Imperia, 2 au 5 mai 2006.

Les objectifs de la campagne de terrain sur le site atelier d'Imperia ont concerné :

- La mise en œuvre de l'ensemble des techniques et méthodes utilisées par les partenaires italiens du programme POSIDONIA pour la cartographie de l'herbier.
- La poursuite des transferts de compétences, des échanges et l'établissement des comparaisons techniques et méthodologiques.

Outre les acquisitions de données (sonar, vidéo remorquée, plongée), des temps de travail ont été dégagés pour faire le point entre les partenaires sur l'avancement du programme, sur les méthodologies et techniques employées (sous forme de présentations) et poursuivre le travail de réflexion concernant ce groupe de travail.

Par ailleurs, dans le cadre du groupe de travail «Surveillance», une plongée sur le site balisé en limite inférieure d'Imperia a été réalisée avec des participants italiens et français. Les partenaires italiens ont pris en charge les aspects logistiques et organisationnels pour le site atelier d'Imperia (Annexe GTcarto4).

2.5 Séminaire de « mi-parcours » de Gênes. 21-23 juin 2006.

Ce séminaire de mi-parcours, qui s'est déroulé en juin 2006 à Gênes, avait pour objectifs :

- La restitution du travail réalisé lors de la première année de ce programme (mi-avril 2005 mi- avril 2006);
- La définition des actions du groupe de travail Cartographie pour la seconde année du programme (mi-avril 2006 mi- avril 2007) .

La synthèse de l'activité menée par le groupe de travail Cartographie au cours de la première année du programme a été présentée par le GIS Posidonie et l'Ifremer. Cette synthèse a notamment porté sur les actions menées sur les sites ateliers de Saint-Raphaël et Imperia. Les objectifs pour la seconde année du groupe de travail cartographie ont également été définis au cours de ce séminaire.

Le déroulement détaillé du séminaire de mi-parcours figure en annexe GTcarto1b.

2.6 Réunion de travail de La Seyne-sur-mer (27 novembre 2006).

Cette réunion, qui a rassemblé l'ensemble des participants du groupe de travail au centre lfremer de Méditerranée, à Toulon, avait pour objectifs de faire un état des lieux des avancées et problèmes rencontrés au sein du groupe de travail Cartographie, et plus particulièrement :

- De définir des objectifs en terme de réalisations pour la finalisation du programme ;
- D'établir un calendrier de réalisations jusqu'à la fin du programme, respectant les échéances de l'autorité de gestion.

Cette réunion de travail, animée par l'Ifremer et le GIS Posidonie, a réuni l'ensemble des partenaires impliqués dans le groupe de travail cartographie ainsi qu' un membre du comité d'évaluation du programme (Prof. A. Meinesz, de l'Université de Nice). Les objectifs du groupe de travail Cartographie et les moyens mis en œuvre lors des différentes campagnes ont été rappelés, en insistant sur le traitement des données et les apports nouveaux depuis le séminaire de mi-parcours de Gènes. La discussion a porté sur les avantages et les limites des différentes techniques utilisées pour la cartographie de l'herbier (acoustiques, aériennes, vidéo et photo sous-marine, plongées) et sur les paramètres cartographiés par ces outils, sur l'avancement des travaux portant sur la bancarisation.

2.7 Séminaire de clôture de Marseille 26-27 mars 2007

Lors du séminare de clôture du programme POSIDONIA, les partenaires du Groupe de Travail « Cartographie » ont présenté leurs activités dans le cadre des missions réalisées sur les sites ateliers de Saint Raphaël et Imperia. La région Ligure a présenté son Atlas cartographique récemment achevé.

La réunion du Groupe de Travail « Cartographie » a été animée par le GIS Posidonie et l'IFREMER. Le 27 mars, dans le cadre de l'ouverture du Symposium International sur la Végétation Marine organisé par le RAC/SPA, une synthèse des activités du Groupe de Travail « Cartographie » a été approuvé par l'assemblée et l'ensemble des partenaires.

2.8 Indicateurs de réalisation

Trois types d'indicateurs avaient été retenus :

- En ce qui concerne les indicateurs de réalisation, les objectifs étaient
 - d'assurer la transnationalité, ce qui a été fait avec les campagnes de terrain et avec les réunions techniques (1 campagne et 1 réunion dans chacune des Régions),
 - d'assurer des partenariats sur la réalisation d'outils communs de protection du patrimoine naturel,
 - o d'assurer des séminaires transnationaux.
- En ce qui concerne les indicateurs de résultats, le groupe de travail Cartographie a atteint ses objectifs grâce à l'emprise des deux campagnes réalisées (les emprises restantes étant couvertes par le groupe de travail bioindicateurs en Corse et en Catalogne), et aux bases transnationales de données.
- En ce qui concerne les indicateurs de gestion, les indicateurs retenus (développement des politiques de gestion / protection du patrimoine naturel et plus grande prise en compte par les collectivités locales des actions conduites concernant la protection du patrimoine), sont couverts par les tableaux de synthèses édifiés dans ce même rapport (Tab. 5 à 8). Les informations de ces tableaux sont en effet structurées pour répondre à des objectifs de cartographie réglementaires (Natura 2000 notamment), ainsi qu'aux gestionnaires méditerranéens qui souhaiteraient effectuer des travaux de cartographie dans un souci réglementaire (parcs régionaux, DCE) ou locaux (aménagements divers), voire cartographiques à grande échelle (limite inférieure de l'herbier à l'échelle d'une région par exemple).

Par ailleurs, plusieurs centaines de courriers électroniques ont été échangés entre l'Ifremer - assurant la coordination - et ses partenaires PACA, Corses, Ligures et Catalans, témoignant d'un suivi et d'échanges fréquents entre tous les partenaires. A ces échanges s'ajoutent une vingtaine de points effectués par l'Ifremer (ou le GIS Posidonie), dans le cadre de la coordination, qui avaient pour but d'effectuer des évaluations et des demandes précises, techniques et administratives, à des moments cruciaux pour le programme.

Ces échanges étaient indispensables pour la préparation des deux campagnes, tant sur le point logistique (contacts avec les autorités portuaires, avec les clubs de plongée pour les stations de gonflage, ,sécurité des plongées, convocation et organisation des relations avec les médias), que sur le point scientifique (harmonisation des mises en œuvre des équipements de vidéo, acoustiques et aériens).

La communication auprès des médias (presse et télévisions régionales ou locales) a également constitué un volet important du programme Posidonia. Ainsi, lors de la mission Posidonia 1, une équipe de reportage du journal télévisé français «France 3 » est venue réaliser un reportage filmé avec une interview du Dr T.Belsher sur le N/O «Europe » le 30/11/2005 (copie de la vidéo disponible sur demande).

Ce document, présentant les différentes techniques mises en œuvre sur le site atelier de St Raphaël, a été retransmis sur le réseau local et régional de France 3 à plusieurs reprises début décembre 2005.

Un article est également paru le 02/12/05 dans le journal Midi Libre traitant des informations générales sur le programme INTERREG-Medocc POSIDONIA et du déroulement de la

mission sur le site atelier de ST Raphaël.

3 Description et principes des différentes filières d'acquisition

<u>Ce paragraphe a été élaboré à partir de l'expérience des acteurs dans le domaine et des</u> sources d'information suivantes concernant les principes :

- Guide méthodologique pour la cartographie des herbiers de Posidonie. Denis J. et al., 2003.
- Cartographie des peuplements macro-benthiques par les méthodes acoustiques en domaine subtidal. Ehrhold A., 2003. http://www.rebent.org/documents/
- Guide RAMOGE. Préservation et conservation des herbiers à Posidonia oceanica. http://www.ramoge.org/ramogefr/

Il traite des techniques acoustiques (en particulier du sonar latéral et des sondeurs), des techniques de vidéo remorquée, de l'imagerie aérienne (par satellite et drone), et des observations en plongée sous-marine (transects de prospection et avec positionnement acoustique GIB).

L'application de ces techniques sur les sites ateliers est abordé au paragraphe suivant.

3.1 Acoustique

SONAR latéral

Le sonar latéral a pour fonction de constituer des images acoustiques détaillées des fonds marins. Le sonar à balayage latéral est un appareil émetteur-récepteur d'ondes ultrasonores qui, remorqué par un navire, permet d'obtenir une image acoustique détaillée, en deux dimensions, des fonds marins. Il répond au principe de fonctionnement suivant : un faisceau d'ondes sonores est émise du poisson remorqué, avec une incidence oblique, et intercepte le fond selon une fine bande s'évasant avec la distance. A l'intérieur de cette zone, le signal émis balaie progressivement la zone couverte. Le signal acoustique, de fréquence ultrasonique, émis par les deux transducteurs logés dans le poisson remorqué, est alors réfléchi avec plus ou moins d'intensité ; l'écho recueilli, au cours du temps, est une représentation de la réflectivité de fond et surtout de la présence d'irrégularités ou d'obstacles. Ce signal, enregistré latéralement à la direction d'avancée du sonar (side-scan sonar) est juxtaposé aux signaux successifs déjà obtenus par le sonar pendant son avancée, constituant ainsi, ligne après ligne, une véritable "image acoustique du fond" (Fig. 2 et Fig. 3).

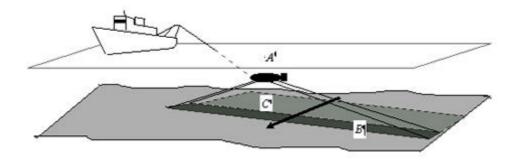


Figure 2. Mise en œuvre d'un sonar latéral - A: poisson remorqué - B: surface insonifiée instantanée C: surface couverte par les émissions précédentes

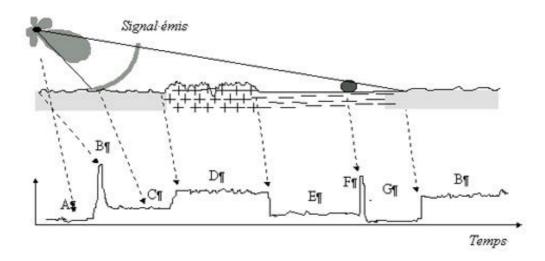


Figure 3. Fonctionnement d'un sonar latéral - A: bruit et réverbération dans l'eau- B: premier écho de fond- C: zone de sable- D: roche- E: vase- F: écho de cible- G: ombre portée par la cible

Les fréquences employées sont en général élevées (typiquement de l'ordre de la centaine de kHz). Les portées sont de ce fait limitées à quelques centaines de mètres. Le traitement des signaux mis en œuvre est très simple dans le principe, la structure du récepteur est du même type que pour un sondeur.

Pour replacer les relevés de manière spatialement correcte, on doit appliquer une correction géométrique, qui se ramène à une simple relation trigonométrique si le fond est plat et horizontal. Lorsque ce n'est pas le cas, la réalisation d'une image correcte demande soit de faire des hypothèses simples *a priori* sur la topographie (fond plan en pente...) soit de compléter le relevé sonar par des mesures de bathymétrie.

Un effet très intéressant est celui de formation d' "ombres" portées sur le fond : Un obstacle de dimension suffisante va intercepter une partie du secteur angulaire vertical émis, et donc interdire la rétrodiffusion par le fond au cours des instants normalement associés à ces angles; l'écho reçu va donc être de très faible niveau pendant une durée dépendant de l'angle de rasance et de la hauteur de l'objet masquant. Ceci va se traduire par l'apparition, sur l'image sonar, d'une "ombre" de forme correspondant à celle de l'objet, et dont l'analyse permettra une estimation de la taille et de la forme de ce dernier. Ce phénomène est d'un grand intérêt pour toutes les applications de recherche et d'identification d'objets posés sur le fond (mines et épaves), voire même pour l'évaluation de certaines échelles de relief du fond.

A terre, les données sonar sont désarchivées, « nettoyées » et traitées numériquement pour validation / géo-référencement. La connaissance de la position de la route suivie par le navire et, par conséquent celle du sonar, moyennant une correction en fonction de la longueur de câble filé, permet de situer sur fond de carte les informations thématiques relatives à l'herbier. Les sonogrammes (Fig. 4) sont assemblés en une mosaïque papier au 1:10 000ème (sur plate-forme CARAIBES® IFREMER), géoréférencée et reportée sur un fond de carte SHOM utilisable sous SIG.



Figure 4. Exemple de sonogramme

Le sonar latéral constitue une technique rapide pour caractériser la surface d'un herbier sur de vastes étendues; il permet en outre de distinguer l'environnement général de l'herbier, à savoir le caractère meuble (vase, sable ou gravier) ou dur des fonds (roche), ainsi que certaines traces anthropiques (traces de mouillage, chalutage, etc.) ou des épaves. En revanche, les sonogrammes ne permettent pas de distinguer des structures inférieures au mètre : de ce fait des intermattes de faible taille ne peuvent être distinguées dans de l'herbier continu par cette technique. Enfin, le recouvrement (en pourcentage) de l'herbier évalué sur les sonogrammes peut présenter des différences significatives avec les relevés effectués *in situ* (en plongée par exemple), en particulier pour les faibles recouvrements (au niveau de la limite inférieure de l'herbier par exemple).

Le type utilisé en milieu côtier et opéré par la filiale ŒNAVIR de l'Ifremer est le sonar à balayage latéral « EdgeTech DF 1000 DCI ».

Il fonctionne selon deux fréquences 105 kHz et 390 kHz.

Sa portée est variable dans une fourchette de 25 à 300 mètres, selon l'altitude et le mode.

L'énergie nécessaire est de 2 kVA en 230 V monophasé et 15 kVA en 400 V triphasé.

Le treuil, à contacteur tournant, opère un câble électroporteur antigiratoire avec armature d'acier (Ø 8,3 mm) à âme coaxiale. Ce câble parcourt une poulie instrumentée pour mesurer, et enregistrer, la longueur filée qui est le paramètre principal de positionnement du poisson.

Le système d'acquisition des données numériques est de type TEI ISIS (constitué essentiellement d'un logiciel de visualisation et de stockage des données). Il comprend une plate-forme PC sous Windows. Les fichiers de données au format *.XTF sont stockés sur des disques magnéto-optiques standard DOS (2,3 Go ou 5,2 Go). Les fichiers au format XTF, offrent une résolution de 4096 niveaux (12 bits).

La visualisation des données est assurée par un enregistreur graphique thermique de type EPC HPS

1000, enregistreur graphique de la marque EPC, offrant une largeur d'écriture de 256 mm. Le sonogramme fournit par l'enregistreur EPC HPS-100 comporte 256 niveaux de gris (8 bits).

L'entrée des données de navigation est de type NMEA0183.

Contacts:

http://www.epclabs.com/

http://www.tritonelics.com

http://www.ifremer.fr/flotte/equipements_sc/equip_acoustiques.htm

Après la mission, les données brutes sonar sont archivées au centre IFREMER de Brest sur Disques optiques numériques (DON) grande capacité. Le traitement a posteriori de ces données nécessite de désarchiver les fichiers «XTF», pour pouvoir « nettoyer » par filtrage numérique puis valider et référencer ces données. La connaissance de la position de la route suivie par le navire et, par conséquent celle du sonar, moyennant une correction en fonction de la longueur de câble filé, permet de situer sur un fond de carte les informations traitées du signal acoustique susceptibles de refléter la présence d'herbiers. Les sonogrammes sont ainsi assemblés sur une mosaïque papier au 1:5000ème grâce au logiciel CARAIBES® IFREMER). Dans un second temps les fichiers issus de la mosaïque sont reportés sur un fond de carte SHOM utilisable sous SIG géoréférencé.

Sondeur monofaisceau

Le principe d'utilisation du sondeur acoustique monofaisceau est basé sur l'émission en simultané de deux fréquences séparées de plusieurs octaves (38 kHz et 200 kHz), ce qui permet d'obtenir des informations de caractérisation des fonds (les différentes fréquences signant les phénomènes environnementaux en fonction de la taille de leur longueur d'onde). La réponse acoustique du sondeur est différente selon que le son se réfléchit sur une zone couverte de végétation ou non (Fig. 5).

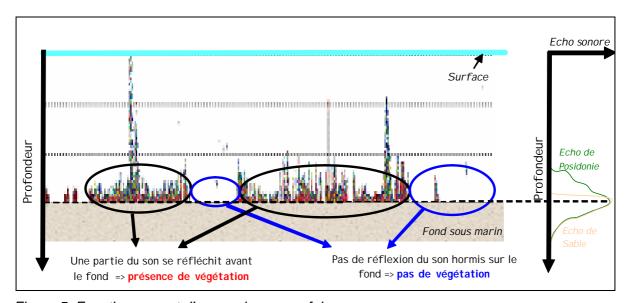


Figure 5. Fonctionnement d'un sondeur monofaisceau

La méthode permet actuellement de distinguer les fonds de sable et de posidonies. Elle est à l'étude sur les mattes mortes et les roches. Cette méthode permet également d'effectuer un levé bathymétrique simultané. Elle permet de calibrer les données prélevées et d'assurer un bon géoréférencement global.

Sondeur multifaisceaux

Les sondeurs multifaisceaux permettent d'obtenir de manière précise et rapide : (i) des relevés topographiques du relief sous-marin (bathymétrie), (ii) des images sonar présentant la réflectivité locale du fond, et donc sa nature (imagerie). L'instrument 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 une très grande résolution.

La plupart des sondeurs multifaisceaux fonctionnent selon la technique dite des faisceaux croisés (Fig. 6). 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 (" pastille insonifiée ") est l'intersection entre le lobe d'émission et le faisceau de réception.

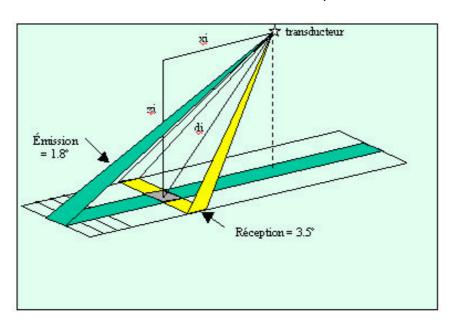


Figure 6. Fonctionnement d'un sondeur multifaisceaux

3.2 Vidéo remorquée

La caméra remorquée est un outil intermédiaire entre le sonar et les plongées en scaphandre autonome. Elle est plus particulièrement utilisée pour des "vérités-terrain"

lorsque de larges zones d'études sont à couvrir, ce qui permet, en outre, de limiter les investigations par plongée et de qualifier précisément les zones d'incertitude dans l'interprétation des sonogrammes. Lors des campagnes d'acquisition, les images sont visualisées à l'écran en temps réel, de façon à identifier et localiser les changements de faciès et tout autre élément caractéristique des fonds. Suite aux opérations maritimes, les images sont revisualisées et commentées pour obtenir une restitution cartographique par S.I.G. de chacun des trajets réalisés.

Le système TRITONE (développé par ARPAL-OLPA) met en œuvre la conjonction de 3 signaux provenant respectivement d'un sondeur, d'une télécaméra sous marine et d'une antenne DGPS. Le système est embarqué à bord d'une embarcation légère. Les signaux sont restitués, en temps réel via une interface informatique qui permet de visualiser simultanément une image du fond, la profondeur, les coordonnées géographiques et le « time code » du point d'acquisition (Fig. 7).

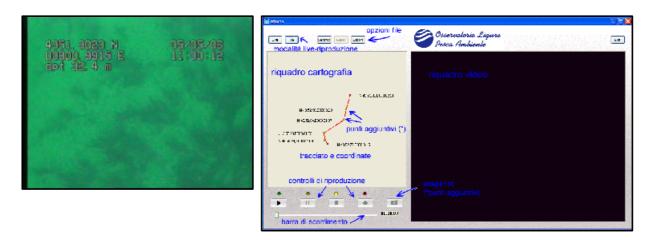


Figure 7. Exemple de restitution visuelle d'une image des fonds marins à partir du système TRITONE. A droite fenêtre de l'interface permettant de piloter le tracé d'acquisition en temps réel.

L'archivage des acquisitions est réalisé (1) par l'enregistrement des images vidéo (la profondeur et les coordonnées géographiques sont incrustés en surimposition sur les images), (2) par la sauvegarde d'un document texte contenant les coordonnées géographiques des points d'acquisition.

Dans le cadre des études sur l'environnement sous-marin en zone côtière (en limite du plateau continental), le Laboratoire Environnement et Ressource Provence Azur Corse (LER/PAC) du Centre IFREMER de Méditerranée a développé, en collaboration avec la région PACA, un système vidéo léger d'observation des biocénoses par engin remorqué (Fig. 8). Ce système est une chaîne d'acquisition complète d'images vidéo numériques géoréférencées, comportant :

Un châssis en tube inox supportant une enceinte sous marine en PVC, et une sonde immergée, remorqué par un câble électro-porteur :

 Caméra couleur Mono CCD Sony FCB EX 470 LP, conditionnée dans l" enceinte sous marine en PVC à hublot plan; alimentée de la surface à partir d'une batterie 12V DC.

- Angle de vision horizontal de 35.6° en milieu aquatique, doublé par un convertisseur optique de X 0.5, portant l'angle de vision à 71.2°;
- Sondeur conditionné dans enceinte caméra et sonde marinisée,
- Câble ombilical électro-porteur de 100 m.. de longueur, permettant le transport de l'énergie et des données images et altimétriques vers le moniteur surface et la centrale d'acquisition.
- En option sur châssis rallongé, 2 projecteurs HID de 25 Watts (équivalents à 80 W. en halogène).

Une centrale d'acquisition surface embarquée sur une embarcation semi rigide de 5.40 m et intégrée dans une cabine d'observation déportée :

- PC portable avec logiciel d'exploitation Windows XP,
- logiciel Videonav Ifremer d'acquisition des données de positionnement image, bathymétrie et altitude caméra ;
- caméscope numérique de type DVCAM Sony DSR 45P, avec écran LCD miniature de 5.1 cm de diagonale)
- GPS FURUNO GP 32;
- Sondeur FURUNO LS 6100.
- écrans LCD petits formats (entre 5" et 7", soit 11 et 15 cm. de diagonales).
 Convertisseur 12 VDC/220V, 600 Watts.

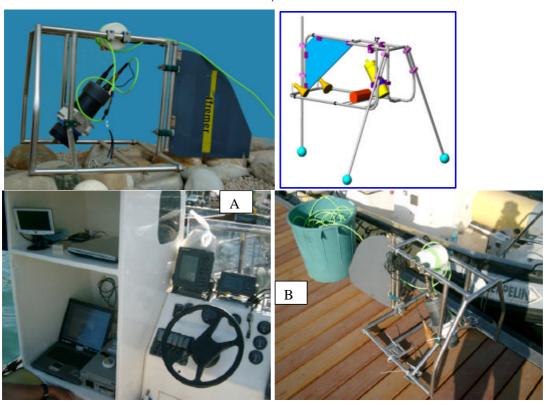
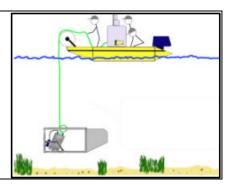


Figure 8. Fonctionnement du système de vidéo-sous marine la chaîne d'acquisition d'images vidéo embarquée (A) la camera vidéo et son support (B). En haut les versions de châssis léger (à gauche) et rallongé avec éclairage (à droite).

Le châssis, support de la caméra et de l'altimètre, est mis à l'eau et remorqué au dessus du fond marin en pendulaire à partir d'un navire côtier à une hauteur connue et enregistrée. Les scientifiques et techniciens embarqués contrôlent à l'aide d'un moniteur vidéo le positionnement de la caméra et procèdent grâce à une interface logicielle à l'acquisition et à l'enregistrement des données images, positionnement géographique, bathymétrie locale et altitude caméra dans la colonne d'eau.



La vitesse d'opération est comprise entre 0.5 et 1 nœud suivant le type et la précision des observations recherchées dans le cadre de l'étude. L'altitude de la caméra enregistrée en continu et sa stabilité verticale sont déterminants pour l'évaluation des paramètres de recouvrement des végétaux marins rencontrés.

Le géoréférencement des données acquises est assuré par le logiciel «VIDEONAV » (Fig. 9), une interface de navigation pour l'acquisition des données GPS, vidéo, sondeur bord, altimètre caméra, time code vidéo. VIDEONAV archive l'ensemble des données dans des fichiers informatiques de format .txt, qui seront complétés en post analyse de commentaires décrivant la nature des biocénoses rencontrées (état général de l'herbier et son recouvrement sur l'ensemble des trajets effectués, localisation des limites supérieures et inférieures, identification des diverses biocénoses de substrats meubles ou durs présentes sur les trajets parcourus, présence et recouvrement de l'algue *Caulerpa taxifolia*, présence d'éléments divers de type macrodéchets anthropiques).

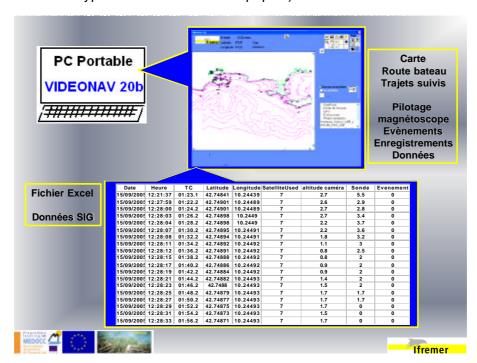


Figure 9. illustration de l'interface du logiciel de navigation VIDEONAV

L'évolution de ce système a conduit au développement d'un nouveau module, plus particulièrement axé vers des images haute définition, de type photographique.

Le PRISME L de l'Ifremer est composé de (i) un châssis en inox, (ii) une centrale d'imagerie optique avec appareil photo, éclairage et flash, (iii) une interface capteurs externes (compas, sondeur), (iv) un actionneur de propulseur, (v) un câble optique électro-porteur et (vi) un moteur de rotation TILT, le tout pour un poids dans l'air de 48 Kg et de 15 Kg dans l'eau.

L'intérêt de la photo par rapport à la vidéo est de pouvoir obtenir des photos statiques (différentes inclinaisons) et représente un bon complément à la vidéo tractée MOBIDIC.

3.3 Données de télédétection

La télédétection, c'est à dire l'étude à distance depuis un capteur d'observation de la terre, constitue un outil pratique et puissant pour l'étude et la surveillance de la terre et de la mer en fournissant une vue d'ensemble des surfaces. Elle est très utilisée en cartographie pour la création ou la mise à jour des cartes.

Dans le cas des herbiers de posidonies, donc d'une cartographie du couvert végétal des fonds, le signal lumineux doit traverser la colonne d'eau avant d'être mesuré par un capteur de télédétection. Ainsi, les données de télédétection ne sont dans ce cas utilisées que pour cartographier la partie supérieure, dans des zones de profondeur allant jusqu'à 20 mètres environ car l'eau ne laisse que peu pénétrer la lumière¹. Parmi les données de télédétection, on distingue deux grands types: les données spatiales, provenant de capteurs orbitaux, embarqués sur des satellites d'observation de la terre, et les données aériennes, provenant de capteurs aéroportés embarqués sur des avions ou autres engins volants (drone, ballons...) utilisés pour acquérir de l'imagerie ou de la photo aérienne. Dans le cadre du programme Posidonia, l'analyse critique des deux types de données, de leur apport à la cartographie des herbiers, en évaluant leurs avantages, inconvénients, limites, contraintes d'utilisation, complémentarité et coût a été réalisé pour le site atelier de saint-Raphaël.

Des exercices de détection de contours ont été réalisés à partir :

- de données d'imagerie satellite d'une part ;
- de données de photographie aérienne d'autre part, en faisant appel à des données de photographie aérienne de l'Institut Géographique National (BDORTHO) et à des données acquises spécifiquement dans le cadre du programme Posidonia en utilisant un drône télécommandé.

Images satellites

Potentiel pour la cartographie des herbiers et principaux capteurs

Les images satellites dans le domaine optique offrent des possibilités intéressantes en matière de cartographie des biocénoses marines. Du fait de l'échelle de travail et de la taille réduite des objets observés, seule l'imagerie satellite à haute résolution (HR) est utilisable pour la cartographie des biocénoses. Elle a été testée avec succès à partir de données de capteurs HR tels que SPOT ou LANDSAT, avec des résolutions entre 10 et 30 mètres. L'arrivée récente des données à très haute résolution (THR), avec des résolutions de 1 à 10

¹ avec des différences notables entre longueurs d'onde (la lumière bleue pénètre par exemple beaucoup plus profondément que la lumière rouge)

mètres, apporte des progrès notables, avec des résolutions proches de celles de la photographie aérienne.

Les capteurs optiques utilisés couramment en cartographie mesurent la lumière solaire reflétée par la surface terrestre dans divers canaux, en général proches des longueurs d'onde visibles. Parmi ces canaux, on compte en général :

- plusieurs canaux individuels correspondant aux longueurs d'onde du bleu, vert, rouge et proche-infra-rouge grâce auxquels on élabore des produits en mode « couleur » (dit aussi mode multispectral). Parmi eux, le canal bleu a un intérêt particulier pour l'observation des fonds marins car c'est le canal pour lequel la transparence de l'eau est la plus grande (une vingtaine de mètres en eau claire);
- un canal particulier dit « panchromatique » qui englobe tout ou partie des précédents et correspond à un mode dit « noir et blanc » (N&B).

Les données satellites ne s'appliquent qu'à des zones de faible profondeur (20-25 m au maximum en eaux très claires) du fait des limites de la pénétration dans l'eau le la lumière dans les domaines de longueur d'onde habituels de l'observation de la terre. On peut considérer, en eau claire (non turbide) que :

- le canal bleu permet de voir jusqu'à environ 20 à 25 mètres de fond
- le canal vert jusqu'à 15 à 20 mètres
- le canal rouge jusqu'à 5 à 7 mètres
- le canal proche infra rouge (PIR) quelques dizaines de centimètres.

Parmi les divers instruments orbitaux THR existants, les caractéristiques des capteurs les plus couramment utilisés et dont les données sont faciles d'accès, ont été comparées, de façon à retenir les plus intéressants, et sélectionner une ou plusieurs images prises en bonnes conditions. Ces systèmes sont les suivants :

- QUICKBIRD, capteur à priori idéal, avec une résolution très fine (70 cm) dans le canal Panchromatique et une résolution « couleur », de 2,8m, avec un canal bleu et une couverture assez bonne de 16,5 x 16,5 km;
- IKONOS, autre capteur potentiellement très bon, avec une résolution « N&B » de 1 m et « Couleur » de 4 m et sensiblement les mêmes canaux que QUICKBIRD, dont le canal bleu ; la couverture géographique est un peu plus réduite, avec 11 x 11 km par image ;
- SPOT5, le dernier né de la série des satellites SPOT, avec une résolution «N&B » de 5m (qui peut s'affiner à 2,5 en « supermode ») et « Couleur » de 10m. SPOT souffre quelque peu de l'absence de canal bleu mais reste utilisable grâce au canal panchromatique qui englobe les longueurs d'onde du bleu et a fait ses preuves pour la détection des limites d'herbiers en zone peu profonde (Voir figure suivante; cf Ganzin, Bernard et Simon, 2004); son grand atout est sa couverture géographique avec des scènes de 60 x 60 km.

Ce type de données permet de repérer les limites des herbiers et de les délimiter, automatiquement par classification numérique, ou manuellement par numérisation sur image, comme cela a été fait dans l'exemple suivant (Fig. 10).

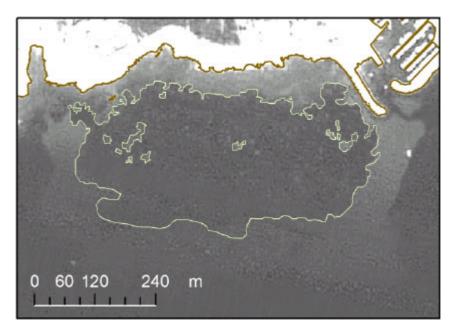


Figure 10. Exemple de délimitation manuelle, par photo-interprétation visuelle, d'une surface d'herbier de la Côte Bleue entre Marseille et le Golfe de Fos sur fond de données panchromatiques SPOT (résolution 2,5m). Pour des entités simples en eau peu profonde, les surfaces trouvées se sont avérées très comparables à celles calculées par la même méthode sur photos aériennes (différence inférieure à 1%).

M Données acquises dans le cadre du programme Posidonia

Suite à recherches sur les sites catalogues des trois capteurs cités précédemment, il a été décidé d'acquérir des données IKONOS sur une fenêtre couvrant la zone d'étude de Saint Raphaël (Fig. 11). Ces données ont été obtenues par panachage de deux images IKONOS adjacentes, prises à deux dates différentes, et extraites sur des zones choisies (polygones gris et roses), comme représenté sur la figure suivante faite à partir des « quick looks² » disponibles sur le site internet correspondant.

 $^{^2}$ Quick Looks : imagettes dégradées fournies en échantillon sur les catalogues d'images

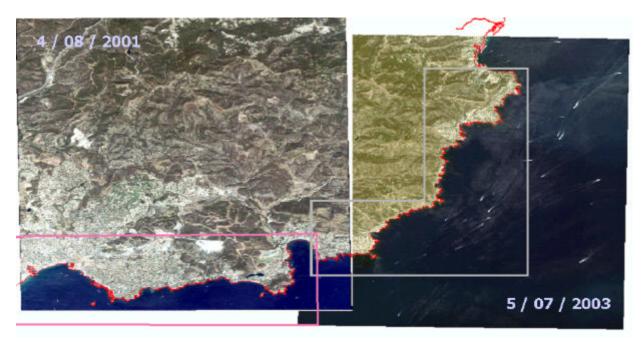


Figure 11. Mosaïque d'images IKONOS adjacentes sur le site atelier de Saint-Rapahaël

Le choix des images a été fait sur les seuls quick looks qui ne renseignent que très partiellement sur la qualité des données du fait de l'échelle très réduite. Il est difficile de se rendre compte de l'état de surface et de la turbidité de l'eau sur des images à très faible résolution telles que les quick looks. Des tâches où la différence herbier-sable était bien visible ont néanmoins pu être discernées.

La figure 12 montre, sur un extrait de l'image du 4/08/2001, un exemple de traitement d'amélioration de dynamique sur une composition colorée des canaux bleu, vert et rouge du capteur IKONOS, avec l'effet sur le contraste et l'amélioration de la détectabilité des contours des herbiers (Résolution 4 mètres).

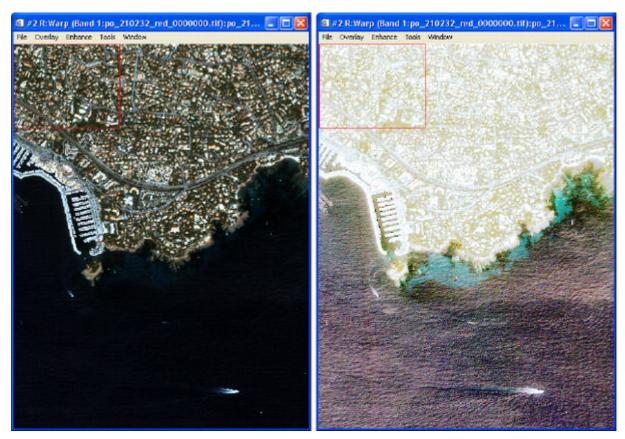


Figure 12. Extrait de l'image IKONOS du 4/08/2001, zone du Lion d'Or, Saint Raphaël. A gauche : composition colorée rouge / vert / bleu. A droite : composition colorée rouge / vert / bleu après amélioration du contraste sur la mer

Les images satellites ont donc un potentiel intéressant en termes de cartographie de la limite supérieure de l'herbier, en particulier en méditerranée avec des eaux relativement peu turbides. La résolution de la THR permet d'avoir un détail relativement fin, même s'il reste inférieur à celui de données prises à plus basses altitude comme les données aéroportées, dont nous parlerons dans la suite. La validation de terrain reste nécessaire pour éviter les erreur éventuelles d'interprétation, comme dans le cas des données aériennes. la résolution des données satellites reste moins bonne que celle de la photographie aérienne, bien qu'elle s'en approche depuis l'avènement de la THR. Elles ne peuvent donc pas remplacer les données des campagnes d'observation mais leur sont au contraire complémentaires grâce à un atout très important : l'aspect multi-temporel, la possibilité de faire un suivi de l'évolution des herbiers par cartographie répétée. La régularité d'acquisition permise par les systèmes orbitaux d'observation de la Terre, le coût relativement peu élevé, la facilité de traitement et d'acquisition par rapport aux campagnes classiques laissent augurer de la possibilité de mises à jour des cartes et études d'évolution à intervalles de quelques années pour la frange côtière.

On pourra aussi noter que la Méditerranée, avec des eaux relativement peu turbides, se prête bien à l'utilisation de données satellites.

Photographies aériennes par avion ou drone

Potentiel pour la cartographie des herbiers et principe de traitement

Les photographies aériennes sont devenues des outils classiques de cartographie des biocénoses marines pour les faibles profondeurs (0-15 m). Les couvertures photographiques aériennes sont en général assurées par des avions photographes spécialement équipés pour les prises de vues aériennes à axe vertical (exemple de l'IGN). Dans le cas du milieu marin, des spécifications très strictes sont à appliquer de façon à optimiser l'exploitabilité des prises de vues : prises de vues verticales effectuées entre mai et octobre, conditions anticycloniques établies depuis au moins 24 heures, absence de vent et de houle, heures de prises de vues tenant compte de l'élimination de la réflexion spéculaire, présence obligatoire d'une bande de terre sur les clichés (Lefèvre et al., 1984; McKenzie et al., 2005). Ces contraintes font, qu'en général, des campagnes spéciales de prises de vues sont programmées. L'échelle de restitution des clichés la mieux adaptée à l'étude des biocénoses marines est comprise entre le1/5 000ème et le 1/10 000ème (pour obtenir une résolution au sol de 15 à 20 cm), en fonction des objectifs de la cartographie et des surfaces couvertes. Moyennant un recouvrement obligatoire de 60 %, un cliché offre une surface utile de l'ordre de 1 km². Une campagne de reconnaissance classique permet de couvrir de l'ordre de 400 km² par jour (en optimisant le temps de vol sur la base de 4 heures).

Le produit de base issu des campagnes de photographies aériennes est le négatif dont le format est en général de 24 cm x 24 cm pour une échelle variant entre 1/15 000ème et 1/30 000ème. Des contacts sont aisément tirés de ces originaux. Ils correspondent au tirage sur papier photographique à l'échelle 1/1 et permettent d'avoir une vue d'ensemble du territoire couvert avec une précision relativement bonne.

Les photographies sont digitalisées et traitées numériquement (rectification géométrique des données à partir de repères à terre très précisément localisés) pour obtenir un orthophotoplan. Sur ces orthophotoplans, visualisés sous SIG, les limites entre structures benthiques sont tracées et une première interprétation en est faite. Une zone claire correspond généralement à une tache de sable, tandis qu'une zone sombre peut correspondre soit à la présence de *Posidonia oceanica*, soit à des accumulations de feuilles mortes de *P. oceanica* sur le fond. Les tons intermédiaires correspondent généralement à de la matte morte ou à des peuplements d'algues photophiles sur roche. Par la suite, ces limites (ou un certain nombre d'entre elles retenues pour un suivi ultérieur) sont validées *in situ* par des plongeurs ("vérités-terrain"). Cette validation est extrêmement importante, dans la mesure où de nombreuses erreurs peuvent résulter de la seule photo-interprétation; les exemples de cartes sans vérité-terrain, ou dont la vérité-terrain a été hâtive, et qui comportent des erreurs grossières, parfois sur de vastes étendues sont nombreux.

Données de photographie aériennes acquises pour Posidonia

Dans le cadre du programme Posidonia, deux sources de données ont été utilisées :

- Photographies de la BD-Ortho de l'IGN; La base de données d'ortho-photographies de l'IGN constitue une source de données pratique, disponible sous forme de « tuiles » adjacentes, qui couvrent en général les bandes côtières aussi bien que l'intérieur des terres. Pour Posidonia, le potentiel de ces données (BD-Ortho de 1998) pour la détection des contours de l'herbier et sa cartographie a été évalué. La figure suivante montre l'exemple de quelques tuiles de la BD-ortho 1998 superposées à l'image IKONOS de 2001 précédemment citée, montrant ainsi la couverture géographique de chaque tuile (Fig. 13).

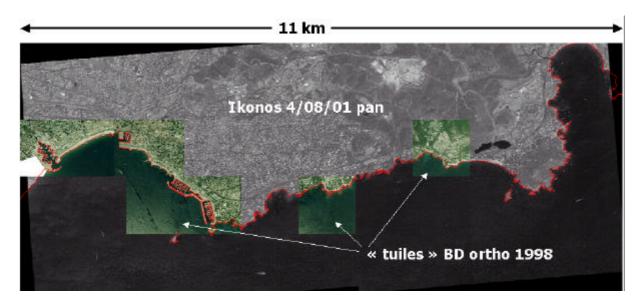


Figure 13. superposition des dalles de la BDORTHO 1998 IGN et de l'image satellite IKONOS sur le site atelier de Saint-Raphaël.

On peut toutefois noter que, la BDORTHO étant plutôt destinée à une utilisation terrestre, les conditions de visibilité des fonds n'est en général pas idéal. Des structures sont souvent visibles, mais les conditions d'éclairement lors des prises de vue font souvent qu'une réflexion de surface fait écran à la visibilité des fonds, comme on peut le constater sur la figure.

- Photographies par drone

Un essai de prises de vue aériennes par drone a été réalisé sur le site atelier de St-Raphaël (Société Le Cyclope). Les caractéristiques de l'appareil radiocommandé sont résumées cidessous

Caractéristiques techniques

aile - faible encombrement

appareil photo numérique 7.5 MP

moteur électrique, altimètre

z récepteur

émetteur vidéo

altitude de 300 m en moins de 4 min

1 km de rayon d'action



Le drone a des aspects pratiques indéniables : il peut être opérationnel en 10 minutes et seules 2 personne sont nécessaires à sa mise en œuvre. Il s'agit donc d'une organisation de campagne beaucoup plus légère que dans le cas de photographie aéroportée. Les limites de ce type de techniques ont toutefois été identifiées :

sufaible autonomie (en rapport avec la surface de la zone prospectée)

vitesse de vent limite 20km/h

- prise de vue en vol plané : altitude de prise de vue non homogène, résolution élevée
- pas de correction d'assiette
- irisations de la mer (soleil, clapot...)

Une limite du système est également sa faible couverture géographique, comme on peut en juger sur la figure 14 où les deux zones couvertes par les photos « drones » sont représentés grâce à un logiciel SIG en superposition à l'image IKONOS Panchromatique de Saint Raphaël.

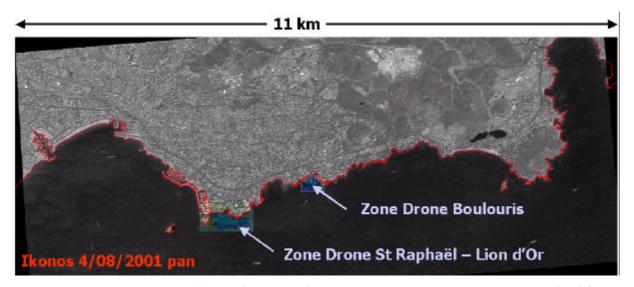


Figure 14. superposition des clichés effectués par drone et de l'image satellite IKONOS sur le site atelier de Saint-Raphaël.

En revanche, la précision de la donnée est excellente, meilleure que celle des images satellites et même des données photographiques aériennes de la BDORTHO, comme on peut en juger sur la figure 15 (voir également la figure 12 précédemment présentée et concernant l'imagerie IKONOS pour la détection des limites).



Figure 15. Détail des prises de vue effectuées par drone et de la BDORTHO 1998 sur le secteur du Lion d'Or, site atelier de Saint-Raphaël.

3.4 Observations en plongée sous-marine

Les observations en plongée sous-marine permettent (i) de localiser les structures particulières de l'herbier de posidonie (limites supérieure et inférieure, faciès) et (ii) d'avoir accès à des paramètres de caractérisation de l'herbier (recouvrement, densités, etc). La connaissance fine de la position géographique du plongeur en opération reste une contrainte importante pour l'intégration au SIG des observations effectuées en plongée. Le positionnement acoustique du plongeur (acoustic positioning) constitue une alternative intéressante à la prise de points GPS (extrémités de transects de prospection ou suivi en surface et localisation des déplacements du plongeur).

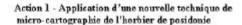
L'utilisation de techniques de photographie ou de vidéo sous marine est une évolution intéressante pour cette approche. Les photographies ou images vidéo collectées peuvent aboutir à une meilleure analyse des paramètres recherchées, ou étoffer les informations manuscrites relevées par les plongeurs. La pérennité de ces informations et leur caractère médiatique tant scientifique que public sont aussi des atouts supplémentaire dans l'aide aux décisions.

Positionnement acoustique GIB

Le système utilisé dans le cadre du programme INTERREGIIB / POSIDONIA est le GIB (GPS Intelligent Buoys), produit par ACSA Underwater GPS³ (France). Le GIB se compose de quatre bouées avec des hydrophones et GPS et d'un émetteur acoustique sous-marin (pinger). Le système est comparable à un système "base longue" de surface. Les bouées mesurent les temps d'arrivée d'un signal acoustique dont l'émission est synchrone du temps GPS. On date avec une précision de 0.1 ms les instants d'arrivée des signaux acoustiques. Connaissant l'instant d'émission de ces signaux (précision 10-8) et la vitesse de propagation du son dans l'eau, on peut en déduire directement les distances entre le pinger et les 4 bouées. La profondeur est donnée par capteur de pression. Le pinger envoi un deuxième signal avec un retard proportionnel à l'immersion. Ces distances sont ensuite ramenées au plan horizontal. Le point mesuré se trouve à l'intersection de cercles centrés sur les bouées (méthode des moindres carrés). Pour optimiser les opérations de cartographie de l'herbier le pinger peut être fixé sur un scooter sous-marin conduit par un plongeur. La distance maximale du pinger par rapport au centre du polygone formé par les 4 bouées peut alors être de 1 500 m environ (Fig. 16 et Fig. 17).

-

³ http://www.underwater-gps.com/index.html





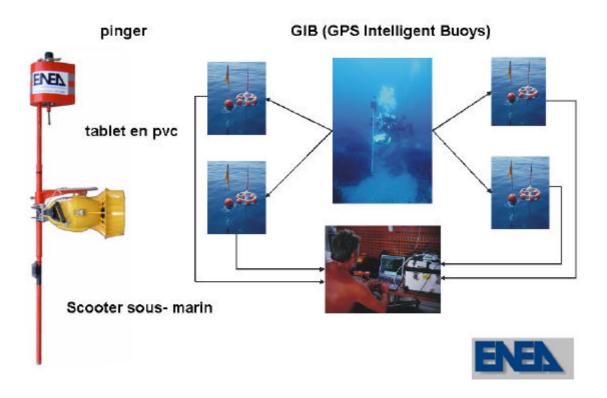


Figure 16. Schéma de fonctionnement du système GIB (GPS Intelligent Buoys), le plongeur avec le « pinger » émetteur du signal acoustique se positionne entre 4 bouées fixes réceptrices du signal. L'utilisation d'un scooter sous-marin permet d'optimiser les temps de parcours.

Le temps de pose/dépose des 4 bouées est évaluée à 20-30 minutes, les bouées étant distantes de 500 m. La station de contrôle est constituée d'un système d'acquisition comprenant une valise poste opérateur et un PC portable. Le système d'acquisition calcule la distance bouée-émetteur, détermine les coordonnées DGPS en WGS84, la profondeur de l'émetteur par triangulation et visualise les points et le trajet du pinger sur un logiciel cartographique dédié.

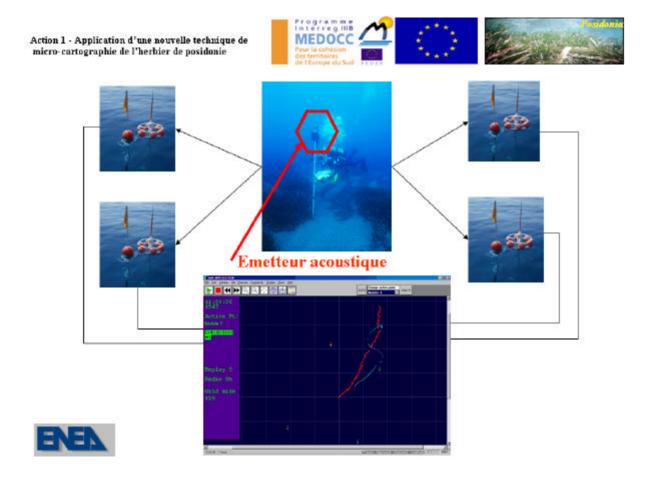


Figure 17. Illustration de la représentation graphique du signal émis par le « pinger » en déplacement, dans une fenêtre de l'interface cartographique dédiée.

Transects de prospection en plongée

Initialement mise au point pour l'étude de la végétation littorale terrestre, la technique des transects a été adaptée avec succès au milieu marin. Elle consiste à dérouler des rubans gradués sur le fond, entre deux points fixes positionnés précisément (GPS). Les axes, ainsi matérialisés, sont parcourus en plongée, et les peuplements et types de fond sont identifiés sur 2.5 m environ, de part et d'autre du ruban gradué. A chaque modification de la végétation, la nature du peuplement, le type de substrat et la bathymétrie sont relevés. L'estimation de l'état de vitalité de l'herbier de posidonie fait appel à plusieurs paramètres standardisés, parmi lesquels, le recouvrement et la densité peuvent faire l'objet d'une représentation cartographique. Le déchaussement des rhizomes, en terme d'indicateur de la fragilisation de l'herbier par rapport à l'hydrodynamisme, et la proportion de rhizomes plagiotropes, indicateurs d'une tendance à la recolonisation, interviennent dans l'appréciation subjective de la tendance évolutive de l'herbier, et donc de sa dynamique.

L'espacement entre les transects est établi, en fonction de la précision désirée. La synthèse des données, qui peuvent être intégrées au SIG, permet d'établir une carte détaillée du secteur étudié. Cependant, si cette méthode apparaît extrêmement rigoureuse, en ce qui concerne la position des peuplements le long du transect (une dizaine de centimètres), elle

ne peut s'affranchir de toute une série d'artefacts (déclivité du fond, relief, cap), qui engendrent des erreurs de localisation supérieures au mètre. En fonction du temps de travail nécessaire à sa mise en oeuvre, elle ne peut s'appliquer qu'à des petites étendues. Une variante de cette méthode consiste à positionner sur le fond un quadrillage (échelle), comme cela est pratiqué couramment en archéologie. La transition d'une donnée ponctuelle ou linéaire à une couverture surfacique s'opère par interpolation. La technique du krigeage permet de tracer des lignes d'égale intensité d'un paramètre, cette méthode ne constitue pas à proprement parler, une technique de cartographie toutefois, elle a été employée avec succès au niveau des herbiers de Posidonies pour la prise en compte de variables continues (densité, recouvrement).

Dans certains cas, la localisation de la limite supérieure de l'herbier peut également être

matérialisée par une simple prospection en plongée libre GPS un différentiel (Fig. 18). Le plongeur suit précisément le contour de la limite, le DGPS enregistre en continu les coordonnées géographiques du plongeur. Le report cartographique se fait par simple intégration sous SIG de la route suivie. La vitesse d'acquisition est de l'ordre de 2-3 km/h. de la précision détection dépend du type de DGPS utilisé, elle peut être submétrique.



Figure 18. Plongeur en surface suivant les contours de la limite supérieure de l'herbier. Le DGPS, en surface, enregistre en continu la route suivie.

4 Sites ateliers: application des techniques et protocoles retenus

4.1 Site atelier de St Raphaël

La campagne d'acquisition de données cartographiques sur le site atelier de Saint-Raphaël avait pour principal objectif de mettre en œuvre, de manière conjointe, l'ensemble des techniques et méthodes utilisées par les partenaires du programme POSIDONIA. Les missions se sont déroulées du 27 novembre 2005 au 01 décembre 2005 et le 13 juin 2006. Trois navires océanographiques ont été mobilisés (« Europe », « Alcyon », « Arianna »). Cinq techniques de cartographie et de vérités terrain ont été employées : (i) photographie aérienne, (ii) sonar latéral, (iii) vidéo remorquée, (iv) plongée sous-marine, (v) GIB au cours de la campagne.

Le tableau 2 récapitule les techniques mises en oeuvre, les secteurs concernés, et les types de résultats obtenus. Les résultats sont exposés dans le rapport des campagnes

d'acquisition de données sur le site atelier de Saint-raphaël en annexe GTcarto3.

Tableau 2. Récapitulatif des opérations de cartographie réalisées sur le site atelier de Saint-Raphaël.

| Dates d'intervention | Secteur | Techniques de cartographie employée | Equipes participantes | Types de résultats |
|-------------------------|---|--|--|---|
| 27/11/2005 | Baie St-Raphaël | Sonar latéral | IFREMER / GIS Posidonie | Sonogramme |
| 28/11/2005 | Rade d'Agay Baie de St Raphaël et pointe des Lions | Sonar latéral Vidéo remorquée | IFREMER - GIS Posidonie ARPAL/OLPA | Sonogramme Radiales vidéo |
| 29/11/2005 | de mer Boulouris | Sonar latéral Vidéo remorquée Plongée sous- marine GIB | IFREMER - GIS Posidonie ARPAL/OLPA | Sonogrammes Radiales Vidéo Observations visuelles (vitalité de l'herbier) Profils GIB |
| 30/11/2005 | Boulouris – Cap d'Aurel | Sonar latéral Photographies aériennes par Drones Vidéo remorquée | IFREMER - GIS Posidonie ARPAL/OLPA ENEA Vision du Ciel | Sonogramme Radiales vidéo Photographies aériennes |
| 01/12/2005 | Rade d'Agay Pointe des Lions | Vidéo remorquée Plongée sous- marine GIB | IFREMER - GIS Posidonie ARPAL/OLPA ENEA | Radiales vidéo Profils GIB Observations visuelles |
| 13/06/2006 | Pointe des Lions | Drone | IFREMER - GIS Posidonie Vision du Ciel | Photographies aériennes |

4.2 Site atelier d'Impéria

La campagne d'acquisition de données sur le site d'Imperia, organisée par l'ARPAL et par l'OLPA, s'est déroulée du 2 au 5 mai 2006. Cette campagne avait plusieurs objectifs :

1. Suivi de l'herbier à *P. oceanica* et mesures correspondantes effectuées en plongée (contrôle des balises, étude des limites de l'herbier et application de la méthodologie

- simplifié de la Région Ligurie).
- 2. Études des limites de l'herbier au moyen de vidéos sous-marines géoréférencées, système TRITONE.
- 3. Application des techniques de micro-cartographie de la limite inférieure proposées par l'ENEA.
- 4. Présentation de la méthode de cartographie de l'IFREMER avec la vidéo remorquée MOBIDIC.

Les campagnes de terrain ont été réalisées à l'aide de 3 N/O (« Arianna », « Stenella », « ENEA »). Trois techniques de cartographie et de vérités terrain ont été employées : (i) sonar latéral, (ii) vidéo remorquée (système Tritone), (iii) plongée sous-marine avec GIB.

Le tableau 3 récapitule les techniques mises en oeuvre, les secteurs concernés, et les types de résultats obtenus. Les résultats sont exposés dans le rapport des campagnes d'acquisition de données sur le site atelier de Saint-raphaël en **annexe GTcarto4**.

Tableau 3. Récapitulatif des opérations de cartographie réalisées sur le site atelier d'Imperia.

| Dates d'intervention | Secteur | Techniques de cartographie employée | Equipes participantes | Types de résultats |
|--|---|--|---|--|
| 02/05/2006 03/05/2006 04/05/2006 | S Lorenzo al Mare Imperia Porto Maurizio | Sonar latéral Vidéo remorquée Sonar latéral Vidéo remorquée Plongée sous- marine + GIB | ARPAL/OLPA ENEA IFREMER - GIS Posidonie | Sonogrammes Observations visuelles (vitalité de l'herbier) Sonogrammes Radiales vidéo Observations visuelles |
| 05/05/2006 | | Sonar latéral | | (balisage) Sonogrammes |

5 Synthèse des filières lacunes, limites, complémentarités

La mise en œuvre conjointe de plusieurs techniques d'acquisition sur le site de Saint-Raphaël notamment, a permis la mise en miroir des contraintes/bénéfices de ces techniques, en termes de : couverture spatiale, effort d'échantillonnage (et donc coût), qualité des résultats (type de données, résolution, etc.). La carte qui suit (Fig. 19) montre l'emprise des secteurs étudiés pour tester les différentes techniques d'acquisition cartographique sur ce site atelier. deux images satellites couvrent également la zone d'étude.

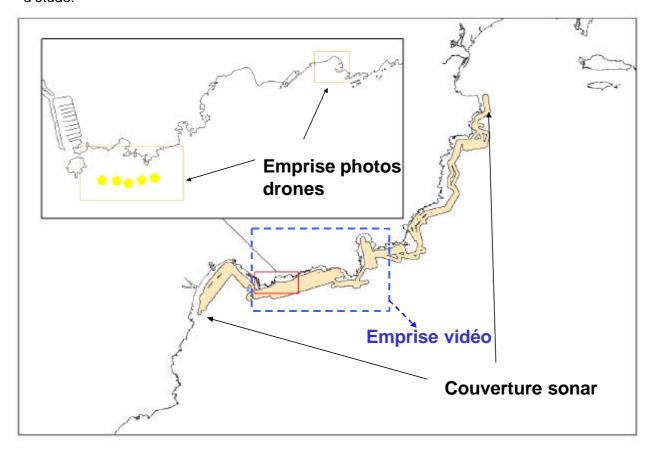


Figure 19. Emprises des secteurs étudiés pour les différentes techniques d'acquisition cartographique sur le site atelier de Saint-Raphaël. 2 vues satellites couvrent également la zone d'étude.

5.1 données de télédétection

Une première analyse comparée a été effectuée sur le secteur d'étude : (i) deux vues satellites commandées sur catalogue (IKONOS, 04/08/2001 et 05/07/2003), (ii) les dalles BDORTHO IGN® (1998 et 2003) et (iii) une série de photographies aériennes par drone spécifiquement programmée dans le cadre du programme POSIDONIA (Société Vision du Ciel) (Fig. 20 et Fig. 21).

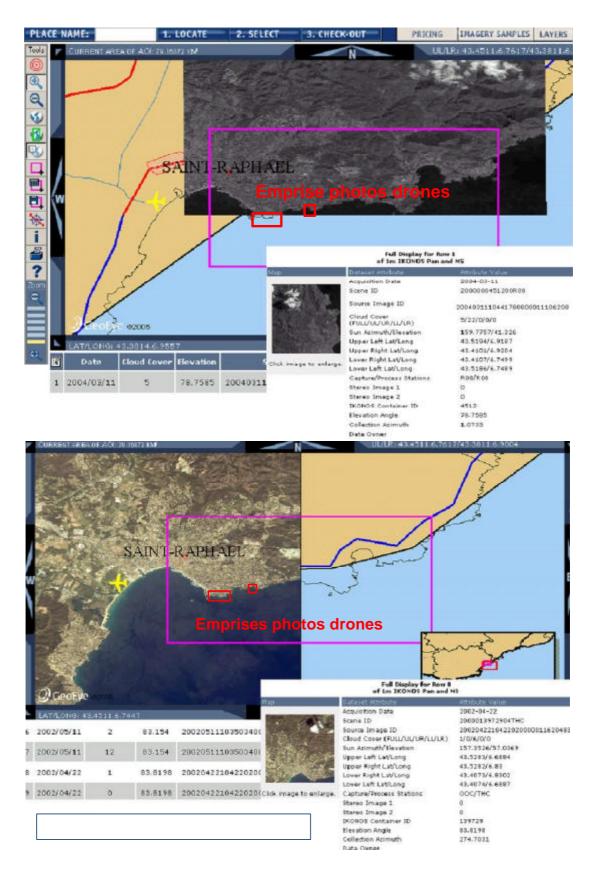


Figure 20. Emprises des vues satellites IKONOS couvrant le site atelier de Saint-Raphaël

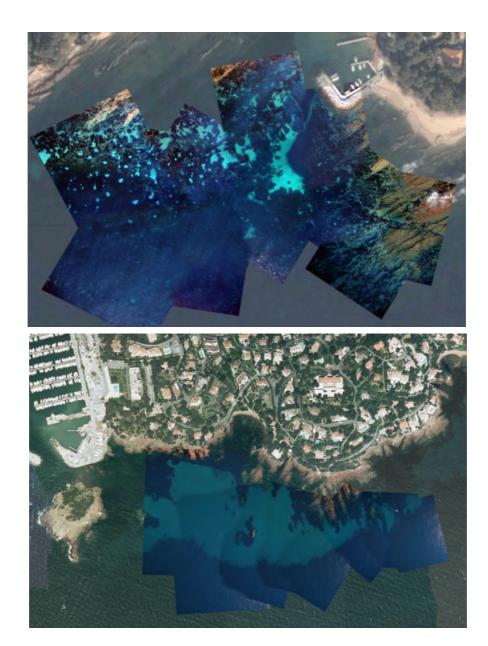


Figure 21. Emprises par mosaïquage des prises de vues aériennes (Drone) corrigées réalisées le 30/11/2005, à très faible altitude et en haute résolution et le 13/06/2006, à altitude maximum (300m).

Une analyse des performances des différentes techniques d'imagerie aérienne a été effectuée (Tab. 4), mettant en exergue – pour chaque technique et chacune des performances retenues – la qualité de l'information obtenue. Cette analyse est intéressante car elle permet de fournir au gestionnaire qui souhaite effectuer une cartographie marine, des données pertinentes en termes de couverture ou de résolution.

Tableau 4. Récapitulatif des performances des différentes techniques d'imagerie aérienne pour la cartographie des herbiers à P. oceanica.

| | Couverture /échelle | Résolution /précision | Piqué /contraste | Besoins informatiques | Coût | Liberté de choix |
|---------------------|------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|------------------|---------------------|
| Image satellite | +++ | +(+ en PAN*) | + | +++ | moyen à fort | ++ à + |
| BD- ORTHO IGN | +++ | ++ | ++ | + | non déterminé | - |
| Campagne drone | + | +++ | +++ | +++ | moyen | +++ |

Excellent +++
Bon ++
Moyen +
Faible -

- Les données satellites THR ont pour principaux atouts une très bonne couverture géographique, permettant de couvrir facilement des zones de plusieurs dizaines de kilomètres. Elles peuvent en outre être traitées relativement facilement pour en extraire l'information, mais nécessitent en général du matériel et des logiciels performants et dédiés. Elles ont en revanche une précision limitée à la résolution, le plus souvent de l'ordre de 1 à 5 mètres, et en termes de qualité des données, n'offrent en général pas ou peu de choix du fait qu'on ne maîtrise pas les dates et conditions d'acquisitions, sauf en cas de « programmation », acquisition très coûteuse où le satellite est programmé spécialement pour une tâche donnée (le plus souvent inaccessible aux civils ou inabordable).
- Les données de type BDORTHO IGN, données de photo aérienne sur catalogue mais plutôt orientées pour leur exploitation terrestre, ont un bon potentiel mais souffrent, comme souvent les images satellites, du choix réduit dans l'état de la colonne d'eau et de la surface. Il arrive couramment que des ortho-photos IGN soient peu exploitables pour des problèmes de réflexion ou de surface rugueuse. Elles sont en revanche très pratiques et faciles d'accès, exploitables sans matériel sophistiqué.
- Les données de campagnes aéroportées offrent de nombreux avantages : la possibilité du choix des dates et de la hauteur des prises de vue, permet de jouer sur les paramètres de qualité et de couverture géographique et ainsi obtenir des données idéalement exploitables et sur des zones assez étendues. Le traitement de géolocalisation et mosaïquage peuvent en revanche être relativement lourds et nécessiter du matériel et des logiciels sophistiqués doublés d'une compétence fine. L'organisation de la campagne spécifique, qui peut être coûteuse en temps et en argent, est aussi un aspect limitant à considérer. Dans ce cadre là, les données acquises par drones sont très intéressantes à la fois pour leur aspect pratique (facilité de mise en œuvre d'une campagne grâce à un équipement léger, liberté de choix des dates et conditions locales) et par la précision qu'apportent les données photographiques acquises à basse altitude. Les limites sont celles de la faible couverture géographique et des limites d'utilisation météorologiques très rapidement atteintes avec des engins aussi légers, mais on peut

^{*} PAN = canal panchromatique

aussi considérer l'avantage de coûts relativement réduits. Géo-localisation et mosaïquage peuvent également être lourds et coûteux en temps.

Les trois techniques d'imagerie aérienne mises en oeuvre lors de la campagne Posidonia 1 répondent à des besoins différents; elles peuvent le cas échéant, être employées de manière complémentaire. Le point commun de toutes les techniques faisant appel à de l'imagerie aérienne est la très forte dépendance aux conditions du milieu (rugosité de la surface et transparence de l'eau).

La présentation détaillée de l'analyse comparée des images satellites et des photographies aériennes est donnée en **annexe GTcarto5**.

5.2 Détection acoustique vs. observations visuelles

La restitution d'une donnée cartographique à partir de relevés au sonar latéral fait appel à des vérités-terrain, par observations visuelles, effectuées en plongée sous-marine ou par caméra. Sur le site atelier de Saint-Raphaël, les moyens de détection acoustique (sonar latéral) et les observations visuelles ont été confrontés :

- Positionnement de la limite inférieure de l'herbier de posidonie par (i) interprétation de sonogramme, (ii) analyse des linéaires de vidéo remorquée, (iii) suivi de la limite inférieure en plongée sous-marine par GIB.
- Caractérisation des paramètres de vitalité de l'herbier (recouvrement, densité) par : (i) interprétation de sonogramme, (ii) analyse des linéaires de vidéo remorquée, (iii) mesure des paramètres in situ en plongée sous-marine.

De la qualité du positionnement dépend la qualité des restitutions de l'ensemble des filières d'acquisition. Lors des missions de terrain, les instruments de positionnement (DGPS, précision < 1-5 m) étaient comparables entre les différentes techniques. Cette condition garantit la bonne juxtaposition des sonogrammes et des informations recueillies en plongée et par vidéo. A partir des données obtenues sur le site atelier de Saint-Raphaël, un estimation de la qualité du positionnement des différentes techniques entre elles a été réalisée (Fig. 22) :

- Entre le tracé donné par le GIB et la position de la limite inférieure relevée sur le sonogramme un décalage moyen de l'ordre du mètre a le plus souvent été constaté (décalage maximal de 6 m).
- Entre la restitution vidéo et le sonogramme, un décalage plus important (compris entre 9 et 21 m) a pu être mis en évidence pour la localisation de la position de la limite inférieure.

Le rapport des limites/bénéfices des trois techniques employées peut être dressé :

- Le **sonar latéral** bénéficie d'une rapidité d'exécution (deux minutes d'enregistrement permettent par exemple de positionner une limite inférieure d'herbier sur plus de 200 m), et d'une restitution surfacique qui facilite l'interprétation. En revanche, la caractérisation fine de la typologie des limites n'est le plus souvent pas accessible. En dessous d'un certain niveau de recouvrement de l'herbier, le seuil de détection du sonar n'est plus suffisant pour identifier la limite de l'herbier (cas des limites régressives très morcelées).

- Le **positionnement acoustique** du plongeur par GIB permet d'avoir accès de manière instantanée à la position absolue (coordonnées géographiques) de la limite inférieure de l'herbier de posidonie; en outre, le plongeur peut, lors de l'intervention, noter les principales caractéristiques de l'herbier (typologie des limites, évaluation visuelle du recouvrement, etc.). Cette technique reste cependant relativement lourde à mettre en œuvre (appareillage important, équipe de plongeurs et matériel afférent), et comporte l'inconvénient d'une restitution limitée (linéaire parcouru, absence d'image en archive).
- La vidéo remorquée permet de conserver une trace fine de la prospection (images vidéo) qui peut, si besoin est, être analysée par différents observateurs sans limite de temps. En revanche, le biais méthodologique lié à la position relative de la caméra par rapport à l'embarcation support peut générer des erreurs de positionnement importantes. en situation de déplacement. Ce biais peut être facilement compensé et éliminé en procédant par points fixes sur des points remarquables de type, changement de faciès et limite inférieure d'herbier. Ce procédé permet d'avoir accès de manière instantanée à la position absolue de la limite inférieure

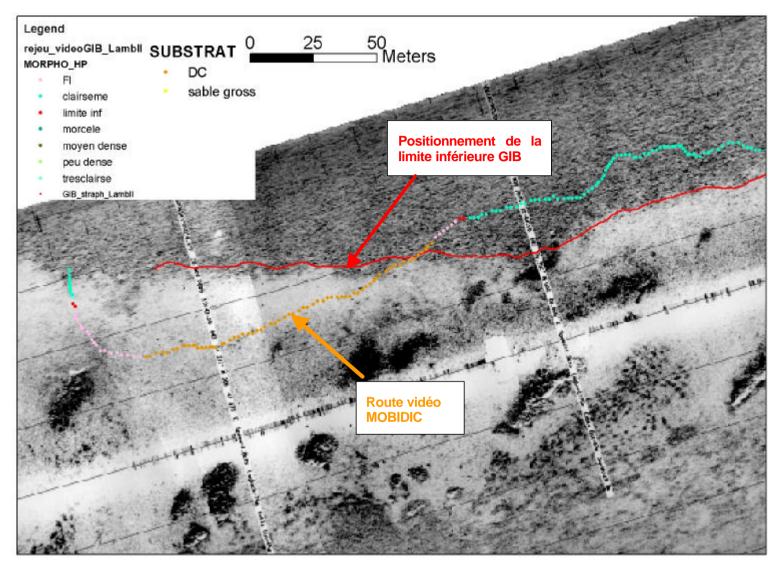


Figure 22. Juxtaposition des sonogrammes et des relevés de terrain effectués en plongée sous-marine (GIB) et en vidéo remorquée pour le suivi de la limite inférieure de l'herbier à P. oceanica sur le site atelier de Saint-raphaël.

Concernant la caractérisation de l'herbier de posidonie la concordance entre la restitution par sonogramme, et les observations visuelles effectuées en plongée sous-marines a été vérifiée en deux secteurs du site atelier de Saint-Raphaël : Boulouris et le Pic d'Aurel.

Dans une première approche, sur les deux sites étudiés, la concordance entre imagerie sonar et observation directe en plongée est bonne, malgré l'importante différence d'échelle (facteur de 1 à 1000).

Les deux techniques apparaissent bien complémentaires: le sonar latéral est bien adapté à l'identification de l'herbier et à sa délimitation, qu'il permet de décrire sur de vastes surfaces mais avec une définition de l'ordre du mètre, alors que la plongée permet l'observation d'éléments de taille décimétrique à centimétrique, sur des surfaces réduites. Le sonar latéral permet également de décrire la morphologie de l'herbier, la présence d'éléments particuliers au sein de l'herbier, ainsi que d'éventuelles discontinuités au sein de l'herbier (taches de matte ou de sable, figures sédimentaires éventuelles), et les faciès particulier de l'herbier (herbier ondoyant). Les observations visuelles en plongée sous-marine donnent accès à une mesure précise des différentes caractéristiques de l'herbier, tels que le recouvrement, la densité (nombre de faisceaux par m²), le déchaussement, ainsi qu'à des informations telles que la présence de taches de matte ou de sable au sein de l'herbier.

Les techniques se complètent également dans l'espace : les profondeurs inférieures à 10 m sont en effet difficilement accessibles aux engins remorqués par un navire.

Des discordances entre les deux techniques, et les limites de l'imagerie sonar sont toutefois mises en évidence sur les sites étudiés :

- le recouvrement généralement important sur les sonogrammes paraît surévalué par rapport aux mesures faites en plongée, notamment lorsque les intermattes sont de taille décimétrique,
- la différenciation entre les herbiers des deux sites, l'un avec un recouvrement de 40%, l'autre de 60%, n'est pas possible par l'intermédiaire des sonogrammes acquis (notamment en raison de la petite taille des intermattes).
- la densité de l'herbier et ses variations le long du transect ne peuvent être appréhendés que par observation directe sur le fond.

Pour ces raisons, la description d'un herbier en termes de recouvrement à l'aide de sonogrammes seuls doit être réalisée avec prudence, et il est préférable de s'en tenir à une évaluation semi-quantitative.

L'ensemble des observations effectuées au cours de cet exercice de calibration du sonar, de la vidéo et de la plongée sous-marine est détaillé en **annexes Gt carto6 et GT carto7**.

Insérer en Annexe le rapport de Philippe Clabaut sur la comparaison sonar/GIB/vidéo.

5.3 Synthèse des informations relatives à la mise en œuvre des différentes techniques de cartographie

Les caractéristiques de mise en oeuvre des différentes techniques d'acquisition employées dans le cadre du programme INTERREG IIIB POSIDONIA (à l'exception du sondeur multifaisceaux) ont été rassemblées et détaillées ci-dessous. Une évaluation du coût global de leur mise en œuvre est donnée, ainsi que ce même coût rapporté à une unité de surface arbitraire. Par exemple, le sonar latéral est une technique relativement lourde à mettre en œuvre mais qui permet de couvrir de très larges surfaces au cours d'une même opération. Elles sont récapitulées dans le tableau ci-après.

Le tableau 5 (en trois parties) est conçu de la manière suivante :

- dans la première colonne, sont mentionnées les différentes techniques utilisées
- dans la deuxième colonne, les modèles utilisés lors des campagnes Posidonia
- dans les colonnes suivantes, figurent les informations relatives à ces techniques et portant sur les moyens d'acquisition (1^{er} tableau), la profondeur d'acquisition, la couverture, la précision du positionnement, les conditions limites d'acquisition (2^{ème} tableau), la résolution, le type d'indicateurs détectés, les paramètres de vitalité de l'herbier, les coûts et les marges d'incertitude (3^{ème} tableau).

Pages suivantes: Tableau 5. Synthèse des informations relatives à la mise en œuvre des différentes techniques de cartographie de l'herbier à P. oceanica mise en œuvre dans le cadre du programme Posidonia.

| Technique | type / modèle | moyens nécessaires | | | | |
|---------------------------|--|---|---|--|----------------|--|
| recinique | type / modele | bateau | appareillage | moyens logiciels | moyens humains | |
| Vidéo remorquée | TRITONE | Tout navire > 2 tonneaux avec alimentation électrique | Camera Mono CCD couleur, DGPS, sondeur, PC portable, moniteur vidéo, magneto DV | acquisition et traitement spécifiques (TRITONE-OLPA) | 2-3 | |
| | MOBIDIC : | | Camera Mono CCD couleur et sondeur altimètre, DGPS, PC portable, moniteur vidéo LCD, magneto DV Cam | acquisition et traitement spécifique (VIDEONAV- IFREMER) | 2-3 | |
| Plongée sous- marine | GIB-ACSA | Tout navire > 3 tonneaux avec alimentation électrique | Balises GIB + pinger, valise acquisition, DGPS, sondeur, PC portable, équipements de plongée | acquisition et traitement spécifique (GIB-ACSA) | 3-4 | |
| | transects | Tout navire > 2 tonneaux | équipements de plongée, GPS, DGPS | aucun | 3-4 | |
| Image satellite | SPOT5-IKONOS- QUICKBIRD | non | aucun | Traitement d'images (amélioration contraste, composition colorimétrique) | 1 | |
| | | | | | | |
| Photographies | campagnes aéroportées* | non | aucun | Traitement d'images (amélioration contraste), géoréférencement | 1 | |
| aéroportées | drone | non | appareil radiocommandé de survol | Traitement d'images (amélioration contraste), géoréférencement | 1 | |
| | | | | | | |
| Sonar latéral | moyenne fréquence (200 KHz), bi- fréquence | N/O > 100 tonneaux | treuils + poulie compteuse et câble électroporteur-alimentation électrique | acquisition-traitement | 2-3 | |
| | | | | | | |
| Sondeur multifaisceaux | echosondeur fréquence > 200 KHz | N/O > 3 tonneaux | treuils et câble électroporteur- alimentation électrique | acquisition-traitement | 2-3 | |

| Technique | type / modèle | profondeur d'acquisition | couverture/échelle précision du positionnement | | conditions limites d'acquisition |
|---------------------------|------------------------------------|-----------------------------|---|---|--|
| Vidéo remorquée | TRITONE | 100 m | Linéaires de 8 à 10 km/jour, vitesse d'acquisition 0,5-1 nds. Surface dépendante de l'altitude de la caméra | en point fixe: < 3 m selon GPS, en progression: selon la distance entre le GPS embarqué et la caméra (fonction de la vitesse et de la profondeur) | Vent < 20 km/h, courant, houle, turbidité |
| | MOBIDIC : | 100 m | Linéaires de 8 à 10 km/jour, vitesse d'acquisition 0,5-1 nds. Surface dépendante de l'altitude de la caméra | en point fixe: < 3 m avec GPS système EGNOS, en progression: selon la distance entre le GPS embarqué et la caméra (fonction de la vitesse et de la profondeur) | Vent < 30 km/h, courant, houle, turbidité |
| | | | | | |
| Plongée sous- marine | GIB-ACSA | 4-60 m | couverture linéaire, acquisition 1 km/h (2-3 km/jour), échelle locale | en progression: 0.5 m | Vent < 30 km/h, courant, houle, turbidité, détection du signal DGPS |
| marino | transects | 0-60 m | couverture linéaire (2-3 km/jour), échelle locale | points fixes: <1-5 m (extrémités transects et relevés ponctuels le long du transect) | Vent < 30 km/h, courant, houle, turbidité |
| | | | | | |
| Image satellite | SPOT5-IKONOS- QUICKBIRD | 0-15 m | couverture jusqu'à 10 km de côte à haute résolution (1 à 5 m), sans limite d'échelle | 1-5 m | Etat de surface de l'eau (absence de rugosité), transparence |
| | | | | | |
| Photographies | campagnes aéroportées* | 0-15 m | couverture à la demande à haute résolution (IGN=0,5 m), sans limite d'échelle | 1-2 m | Etat de surface de l'eau (absence de rugosité), transparence |
| aéroportées | drone | 0-15 m | couverture locale à haute résolution (<0,5m), limité aux grandes échelles | < 1 m | vent < 10 km/h, état de surface de l'eau (absence de rugosité), transparence |
| | | | | | |
| Sonar latéral | moyenne fréquence | 15-150 m | 100-600 m de fauchée. Vitesse d'acquisition 0,5-1 km²/heure. Sans limite d'échelle | 1-30 m** selon la précision du positionnement du poisson et la longueur du lay-back, le courant, la pente | courant, vitesse du vent <30km/h, houle, turbidité de l'eau |
| | | | | | |
| Sondeur multifaisceaux | echosondeur fréquence > 200 KHz | 2-50 m | 50-200 m de fauchée. Vitesse d'acquisition 1km²/heure selon la profondeur. Sans limite d'échelle | < 1 m** (si sondeur embarqué) | courant, vitesse du vent <30km/h, houle |

| Technique | type / modèle | résolution de la détection | détection dans l'herbier de posidonie | paramètres de vitalité de l'herbier (mesurés ou estimés) | coût global opération | coût rapporté à la surface couverte | Marge d'incertitude |
|---------------------------|------------------------------------|-------------------------------|--|--|--------------------------|---|---|
| Vidéo remorquée | TRITONE | < 0,5 m | faciès, typologie détaillée, limites, environnement | Recouvrement estimé | ++ | ++ | selon qualité du positionnement. Qualité du traitement liée à l'opérateur |
| | MOBIDIC | < 0,5 m | sédimentaire | | ++ | ++ | terrain et post-traitement |
| | | | | | | | _ |
| Plongée sous- marine | GIB-ACSA | < 0,1 m | faciès, typologie détaillée, limites, tous paramètres mesurés de caractérisation | Recouvrement mesuré à micro-échelle (m²)-densités- | ++ | +++ | selon qualité du positionnement, qualité des |
| manno | transects | < 0,1 m | de l'herbier, environnement sédimentaire | tous paramètres vitalité- prélèvements | + | +++ | observations liée à l'opérateur en plongée |
| | | | | | | | |
| Image satellite | SPOT5-IKONOS- QUICKBIRD | < 5 m | faciès, grandes typologies, limite supérieure | recouvrement à grande échelle (km²) | ++ | + | qualité du traitement liée à l'opérateur |
| | | | | | | | |
| Photographies | campagnes aéroportées* | < 2 m | faciès, grandes typologies, | recouvrement à grande | ++ | + | selon résolution des photographies et selon qualité |
| aéroportées | drone | < 1 m | limite supérieure | limite supérieure échelle (ha) | + | ++ | du géoréférencement, qualité du traitement liée à l'opérateur |
| | | | | | | T | |
| Sonar latéral | moyenne fréquence | < 5-10 m | faciès, grandes typologies, limites, environnement sédimentaire | recouvrement estimé | +++ | + | selon longueur du lay-back et du positionnement a posteriori du poisson. Qualité du traitement liée à l'opérateur. |
| | | | | | | | |
| Sondeur multifaisceaux | echosondeur fréquence > 200 KHz | < 0.5 m | faciès, grandes typologies, limites, environnement sédimentaire | recouvrement estimé | +++ | + | Selon qualité de l'acquisition (zones d'ombre), qualité du traitement lié à l'opérateur |

N/O = navire océanographique

^{*} Dalles BDORTHO IGN® (1998-2003) disponibles en Région PACA dans le cadre d'une convention CRIGE/IGN/Région PACA.

^{**} Augmentation de la précision du positionnement (<1m) si système acoustique et centrale inertielle permettant de connaître la position du poisson (et roulis par rapport au bateau).

Les moyens nécessaire à l'acquisition de la donnée cartographique sont extrêmement variable selon la technique employée (moyens nautiques, logistique, personnel embarqué et informatique). Le sonar latéral et le sondeur multifaisceaux sont les outils qui nécessitent la logistique la plus lourde, en termes de taille de navire (navires océanographiques), d'équipage, et de moyens informatiques d'acquisition et de post traitement. La vidéo remorquée et la plongée sous-marine peuvent être opérées par des équipes restreintes à partir d'embarcations plus petites, ces techniques nécessitent toutefois deux à trois opérateurs, jusqu'à 4 opérateurs pour la plongée sous-marine. La visualisation des images vidéo s'effectue avec du matériel et un logiciel spécifique. Enfin, l'acquisition d'images aériennes ne nécessite aucune logistique particulière lorsqu'il s'agit de sous-traitance (achat d'images a un prestataire spécialisé).

Pour les acquisitions de terrain, la surface qui peut être couverte par journée de travail est proportionnelle à la logistique mise en œuvre : une journée de sonar latéral permet ainsi de couvrir 8 à 10 km² d'herbier, tandis que 8 à 10 km linéaires seront parcourus en vidéo remorquée et qu'une journée de plongée ne permettra de prospecter que 2 à 3 km (si prospection de la limite supérieure en apnée, jusqu'à 2-3 km/h). L'imagerie aérienne reste la plus rentable en terme de surface couverte par rapport à la logistique nécessaire pour l'opérateur, les images peuvent couvrir plusieurs km² de côtes, sans limite d'échelle, à haute résolution. Toutefois leur interprétation se limite à la zone comprise entre 0 et 15 m de profondeur. Par ailleurs, les conditions limites pour l'utilisation de l'imagerie aérienne peuvent être contraignantes (facteurs météorologique et hydrologique important).

Les techniques d'acquisition répondent généralement à des besoins différents. Les produits de restitution peuvent donc difficilement être comparés en termes de résolution (la précision de la détection varie entre 0.5 et 10 m selon les techniques), de type d'information obtenue (qualitative, quantitative, mesurée, estimée, etc.) et de facteurs intervenant sur leur qualité (zones d'incertitudes, qualité du positionnement, qualité du traitement).

Les **images aériennes** figurent parmi les techniques qui offrent les meilleures résolutions (jusqu'à 0.1 m de précision pour les clichés de petites zones prises à très basse altitude) tout en permettant de couvrir des secteurs très étendus (alors au détriment de la résolution). Elles offrent donc une large palette de possibilité d'utilisation, selon les besoins, mais sont limitées en profondeur à 15 m.

Le **sonar latéral** bénéficie d'une rapidité d'exécution, entre 10-15 m et 150 m de profondeur (deux minutes d'enregistrement permettent par exemple de positionner une limite inférieure d'herbier sur plus de 200 m), et d'une restitution surfacique qui facilite l'interprétation. En revanche, bien que les progrès technologiques récents aient permis d'accroître de manière significative la résolution des moyens acoustiques de détection, la caractérisation fine de la typologie des limites n'est le plus souvent pas accessible. En dessous d'un certain niveau de recouvrement de l'herbier, le seuil de détection du sonar n'est plus suffisant pour identifier la limite de l'herbier (cas des limites régressives très morcelées). En terme de détection acoustique le sondeur multifaisceaux, non utilisé dans le cadre du programme Posidonia offre un certain nombre d'avantages techniques (opérable dans les petits fonds avec une résolution élevée et des contraintes logistiques moins lourdes. En revanche, la restitution perd en qualité au-delà de 25 m de profondeur).

La **plongée sous-marine** permet d'avoir accès aux principales caractéristiques de l'herbier de posidonie (typologie des limites, faciès, etc.) et à la mesure quantitative des paramètres de vitalité de l'herbier (recouvrement, densité, etc.). En outre, le **positionnement acoustique** du plongeur par GIB permet d'avoir accès de manière instantanée à la position absolue (coordonnées géographiques) des points d'observation.

La vidéo remorquée permet de conserver une trace fine de la prospection (images vidéo)

qui peut, si besoin est, être analysée par différents observateurs sans limite de temps. Cette technique permet de mettre en évidence certaines caractéristiques de l'herbier (recouvrement, nature des fonds, etc.) en couvrant des linéaires importants. La vidéo remorquée est parfaitement complémentaire des techniques de détection acoustique dont elle permet d'affiner l'interprétation et des méthodes plus fines (mais opérées à une échelle très locale) de caractérisation par plongée.

L'ensemble des techniques d'acquisition peuvent être mises en œuvre de manière complémentaire, selon les besoins, l'étendu des zones à couvrir et la qualité de restitution recherchée.

Le coût de mise en œuvre est également un critère de choix important pour le gestionnaire en charge d'une cartographie des herbiers. Le tableau 6 donne des éléments de comparaison chiffrés (première estimation sur la base des tarifs moyens pratiqués en 2006) pour les différentes techniques.

Tableau 6. Estimation des coûts journaliers en fonction des surfaces couvertes et du type d'information obtenue pour les différentes techniques d'acquisition.

| Technique | Moyens mis en oeuvre | Surface couverte | Coût | Principales Informations obtenues |
|-------------------------|--|------------------------------------|----------|---|
| Vidéo remorquée | Embarcation, opérateurs, appareillage, temps de traitement | 8-10 km linéaires | 3 000/j | Localisation des faciès (résolution 0.5-5 m) |
| Plongée sous- marine | Embarcation, opérateurs, plongeurs, équipement, appareillage (GIB)° | Points fixes / 2-3 km linéaires | 3 000/j | Paramètres de caractérisation de l'herbier (résolution <0.5 m) |
| Images satellites | Achat d'image, temps de traitement | 50 km² | 5 000 | Surface couverte (résolution <5m) |
| Photographies aériennes | Achat d'image, temps de traitement | 10 km² | 5 000 | Surface couverte (résolution <0.5m) |
| Sonar latéral | Navire océanographique, équipage, opérateurs, temps de traitement | 8-10 km² | 10 000/j | Surface couverte (résolution 5-10m) |

Le coût des différentes techniques est directement proportionnel à la logistique nécessaire à la mise en œuvre, il s'agira donc pour le gestionnaire de définir précisément ses besoins en termes de surface à couvrir, de tranches bathymétrique et du niveau de précision recherché.

6 Standardisation de la nomenclature et de la charte graphique

6.1 Nomenclature

La plupart des cartes réalisées en Méditerranée concernent l'herbier à *Posidonia oceanica* et/ou les systèmes adjacents comme les autres espèces de magnoliophytes marines, herbiers à *Zostera* et à *Cymodocea nodosa*. A quelques exceptions près (entre autres Molinier & Picard, 1952; Augier & Boudouresque, 1970; Bernard *et al.*, 2003b; El Asmi-Djellouli *et al.*, 2000; El Asmi *et al.*, 2003; Riveill *et al.*, 2003), les cartes ne prennent pas en considération les différents types (= faciès) que l'on peut observer au sein des herbiers de posidonie: récif-barrière, herbier de plaine, herbier de colline, herbier tigré, herbier en escalier, micro-atoll, l'herbier ondoyant et l'herbier en pain de sucre (Boudouresque *et al.*, 1985a, 1986, 2000; http://www.gisposidonie.org; http://ramoge.org).

Le niveau de précision qu'il est possible d'apporter à la description de la variété des différents faciès au sein d'une zone d'herbier est — comme nous l'avons vu au paragraphe précédent - directement lié aux techniques de cartographie mises en œuvre. L'hétérogénéité des aspects de l'herbier peut être très nettement décrite à partir de l'interprétation de photographies aériennes, à faible profondeur, où des îlots de taille très modeste peuvent être distingués, ainsi que les structures d'herbier particulières comme les récifs-barrière. Sur les zones d'herbier plus profondes en revanche, l'interprétation des sonogrammes par exemple ne donne accès qu'au recouvrement de l'herbier qui peut généralement être classé en herbier à recouvrement important (faciès acoustique sombre) et herbier à recouvrement moyen à faible (faciès acoustique clair), sans pouvoir mettre en évidence les reliefs de la matte (herbier de colline, herbier en escalier, à l'exception des tombants de matte importants (Paillard et al., 1993).

La matte morte crée des discontinuités dans les zones d'herbier. Celles-ci sont aisément identifiables, à faible profondeur, par l'analyse des photographies aériennes, ou, plus en profondeur, par l'analyse des sonogrammes, ainsi que par vidéo remorquée. La taille des intermattes qui peuvent être détectées dépend alors essentiellement de la résolution des restitutions (sonar ou images). En revanche la matte morte est fréquemment recouverte de sédiments fins, ce qui tend à sous-estimer sa surface.

La plupart des cartes renseignent sur la présence ou l'absence d'herbier, elles sont qualitatives. Très peu renseignent sur des catégories intermédiaires, par exemple "herbier dégradé" ou mettent en miroir des herbiers à fort et faible recouvrement ou densité. L'augmentation du niveau de description passe alors par des techniques de relevés in-situ, comme la plongée sous-marine ou, dans une certaine mesure la prise d'images (photographie et vidéo remorquée). L'interpolation des données obtenues sur des points d'observation (généralement par krigeage) permet alors d'inclure dans la nomenclature un niveau de vitalité, comme la densité de faisceaux (Francour & Marchadour, 1989). Dans le cas de la densité de faisceaux, celle-ci est naturellement dépendante de la profondeur et ne peut donc être considérée de manière absolue comme un indicateur de bonne santé de l'herbier. Les valeurs mesurées dans l'herbier doivent donc être évaluées au regard d'une gamme de densités considérées comme normales, supérieures ou inférieures à la normale pour une profondeur donnée (selon Pergent et al., 1995; Pergent-Martini et al., 1999). Les informations sur la vitalité de l'herbier et le cas échéant sur sa dynamique (régression ou progression connues des marges) peuvent alors être surimposées aux cartes de surfaces couvertes (Bernard et al., 2003; Bonhomme et al., 2003).

En tout état de cause, la demande grandissante des gestionnaires du littoral de disposer d'un outil de suivi des herbiers de posidonie met clairement en évidence la nécessité d'opérer la transition entre des cartes spécifiquement qualitatives (présence/absence) et des cartes quantitatives (renseignant sur la dynamique temporelle de l'herbier).

6.2 Charte graphique

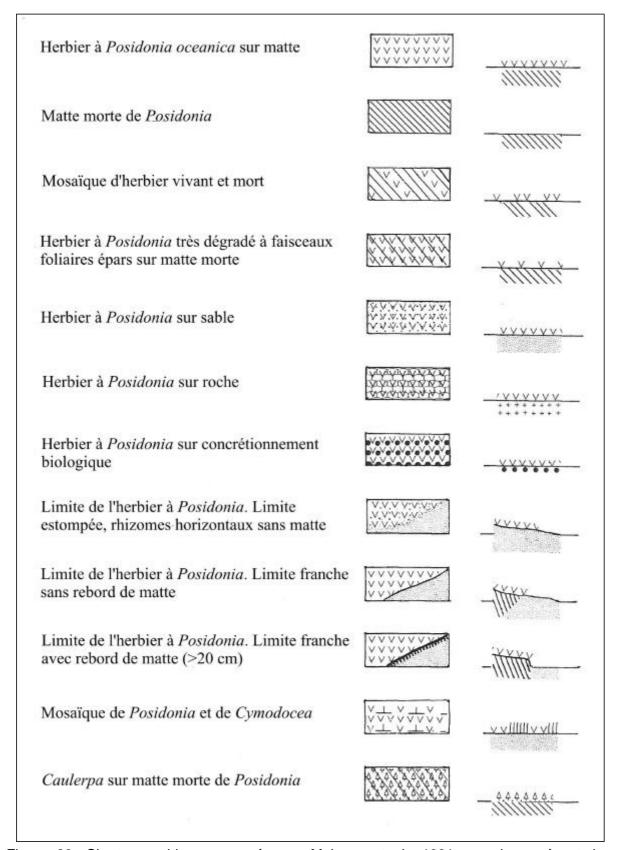


Figure 23. Charte graphique proposée par Meinesz et al., 1981 pour la représentation cartographique de l'herbier à P. oceanica.

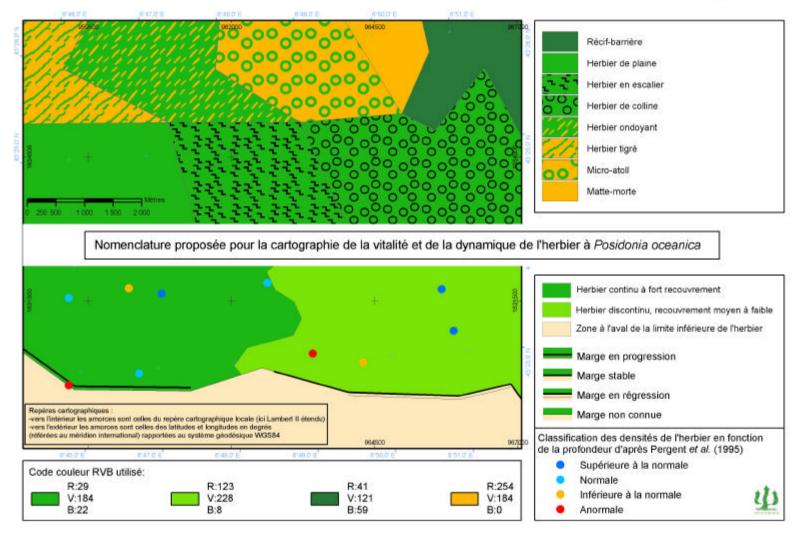
La charte graphique (Fig. 23) publiée par Meinesz et al. (1981) a été incrémentée sous la forme d'une banque de données SIG (formats compatibles ArcView® et MapInfo®), compilant les nomenclatures applicables aux cartographies de l'herbier de posidonie en Méditerranée, à l'usage des opérateurs et des gestionnaires. Cette base a la prétention d'avoir une certaine exhaustivité, de manière à fournir aux utilisateurs un choix d'items le plus large possible en fonction des besoins qui sont exprimés et du degré de précision souhaité pour la cartographie. La charte graphique numérique, qui est présentée dans les figures 24 et 25 sera fournie sous format numérique (CD-ROM).

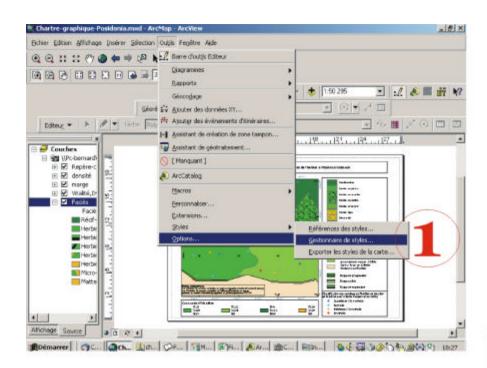
Pages suivantes:

Figure 24. Nomenclature et charte graphique proposée pour la cartographie de l'herbier à Posidonia ocanica.

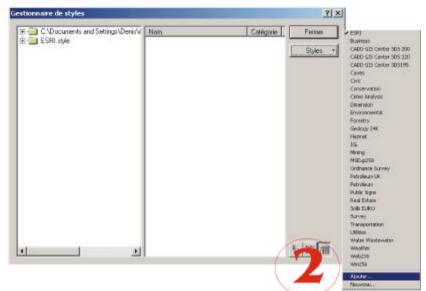
Figure 25. Illustration de l'application de la charte graphique dans un SIG de type ArcView®.

Nomenclature proposée pour la cartographie des faciès de l'herbier à Posidonia oceanica





- 1) Outil>Style>gestionaire de Style
- 2)Style>Ajouter
- 3)Parcourir et chercher le fichier Posidonia.style dans ...\charte graphique\FichierSIG\Style et "ouvrir"





Selon les techniques de cartographie employées, les informations permettant de compléter les différents points de cette nomenclature sont accessibles ou non. En outre, les informations obtenues pourront être de type qualitatif ou quantitatif. Dans la plupart des cas, il sera nécessaire de panacher les différents moyens d'acquisition pour aboutir à une description cartographique la plus complète possible des herbiers de posidonie.

Le tableau 7 récapitule, pour les deux cas pris en compte ci-dessus - à savoir détermination des faciès de l'herbier et caractérisation du degré de vitalité – les performances de chacune des méthodes étudiées dans le cadre de ce programme.

Tableau 7. moyens nécessaires à la cartographie des herbiers à P. oceanica en fonction du degré de précision recherché dans sa description (typologie et dynamique) : accès à une information de type qualitative ou quantitative, restitution cartographique surfacique, linéaire ou ponctuelle.

| | Sonar latéral- sondeur multifaisceaux | Vidéo remorquée | Imagerie aérienne (satellite/photogr aphies) | Plongée sous- marine (transects/positi onnement acoustique) |
|--------------------------------|---|--------------------|---|---|
| Faciès | | | | |
| Herbier de plaine | quantitatif | semi-quantitatif | quantitatif | qualitatif |
| | surfacique | linéaire | surfacique | ponctuel-linéaire |
| Herbier en relief (de | quantitatif | semi-quantitatif | quantitatif | qualitatif |
| colline, en escalier) | surfacique | linéaire | surfacique | ponctuel-linéaire |
| Herbier ondoyant | quantitatif | semi-quantitatif | quantitatif | qualitatif |
| | surfacique | linéaire | surfacique | ponctuel-linéaire |
| Herbier tigré | quantitatif | semi-quantitatif | quantitatif | qualitatif |
| | surfacique | linéaire | surfacique | ponctuel-linéaire |
| Micro-atoll | non accès | semi-quantitatif | quantitatif | qualitatif |
| | | linéaire | surfacique | ponctuel-linéaire |
| Récif-barrière | non accès | non accès | quantitatif | qualitatif |
| | | | surfacique | ponctuel-linéaire |
| Vitalité, dynamique | | | | |
| Herbier continu à | quantitatif | qualitatif | qualitatif | quantitatif |
| fort recouvrement | surfacique | linéaire | surfacique | ponctuel |
| Herbier discontinu à | quantitatif | qualitatif | qualitatif | quantitatif |
| recouvrement moyen à faible | surfacique | linéaire | surfacique | ponctuel |

| Densités (sup à la normale / normales / inf à la normale / anormale | non accès | non accès | non accès | quantitatif ponctuel |
|--|-----------|------------------------|-----------|-------------------------|
| Dynamique (marges en progression/stables/ régression) | non accès | qualitatif linéaire | non accès | quantitatif ponctuel |

Chacune des techniques d'acquisition cartographique ne permet pas de répondre à l'ensemble des questions qui peuvent être posées sur la description de l'herbier à P. oceanica ou sa dynamique temporelle. Une fois encore, le choix de la méthode dépendra du niveau d'information souhaité dans la nomenclature. Il sera par exemple difficilement envisageable de prévoir une analyse quantitative (mesurée) du recouvrement de l'herbier sur une carte réalisée à l'échelle régionale. De manière similaire, ne pas prévoir de mesures du recouvrement ou de la dynamique des marges, à l'échelle locale serait restrictif en terme d'éléments pour une éventuelle prise de décision de gestion. La stratégie habituellement retenue pour les zones de grande taille consiste en la combinaison de deux niveaux d'information :

- 1. Délimitation des surfaces couvertes et qualification des principaux faciès d'herbier sur la totalité du secteur d'étude
- 2. Caractérisation quantitative des paramètres de vitalité et de la dynamique des marges pour des secteurs d'intérêt particulier (zones à forte influence anthropique ou au contraire zones naturelles préservées)

Ce type de méthodologie fait alors appel à la conjonction des techniques de détection acoustique, de l'imagerie aérienne et des observations visuelles (images vidéo et plongée sous-marine).

7 Synthèse et recommandations aux gestionnaires

Au-delà du seul souci d'enrichissement de la connaissance scientifique, la réalisation de cartographies des biocénoses benthiques doit apporter un élément de réponse aux responsableset aux élus chargés de la gestion du littoral.

En fonction des objectifs de gestion, les décideurs disposent d'une large palette d'outils susceptibles de répondre à leurs besoins, le choix parmi les méthodes présentées devant mettre en adéquation la précision recherchée *versus* le coût de l'opération.

Ainsi, l'étude initiale d'un secteur pour lequel les informations disponibles sont peu nombreuses nécessite le recours à des cartographies de **petite échelle** (couvrant de grandes surfaces), dont le niveau de précision (en termes de résolution) est directement proportionnel au coût de réalisation (cartographie de l'herbier de Posidonie autour de la Corse par exemple).

A l'inverse, l'évaluation d'un impact écologique (sur l'herbier notamment) suite à un projet d'aménagement littoral va nécessiter des cartographies d'une grande précision (grande échelle), métrique dans le cas de l'implantation d'ouvrages à proximité d'un herbier de Posidonie, mais couvrant des secteurs très locaux (cartes de très grande échelle).

Le recours à des cartes d'échelle intermédiaire a été identifié, notamment, pour la caractérisation de sites naturels remarquables (cas des sites NATURA 2000 en Europe).

Enfin, les cartographies sensu stricto s'avèrent mal adaptées pour détecter d'éventuelles fluctuations de l'extension temporelle de l'herbier de posidonie; il est alors nécessaire de recourir à des outils spécifiques de surveillance de l'herbier (marques-repères fixes en particulier).

Les besoins exprimés par les gestionnaires, dans le cadre du programme INTERREG IIIb POSIDONIA, en termes de cartographie de l'herbier à *P. oceanica*, ont permis de proposer une suite logique d'acquisition et de traitement de données cartographiques pour trois cas les plus courants :

- ?? Echelle régionale (1:25 000 à 1:50 000)
- ?? Echelle d'un site Natura 2000 (1:5 000 à 1:10 000)
- ?? Cadre d'un projet d'aménagement côtier (type étude d'impact au niveau local 1:1 000 à 1:5 000)

Chaque projet de cartographie de l'herbier est, en soi, un cas particulier dont la méthodologie employée et le coût dépendent principalement de l'importance surfacique de la zone d'étude à couvrir ainsi que de la configuration précise des lieux et de l'herbier de posidonie, en particulier. Ces paramètres conditionnent directement la nature et le volume des interventions à la mer, le type et la quantité de données à exploiter et, en conséquence, la durée des opérations et les temps d'intervention des personnels affectés aux tâches correspondantes.

A titre d'éléments de réflexion sont présentés ci-dessous trois exemples types des techniques à mettre en œuvre et du budget pour des cartographies de l'herbier de posidonie réalisées à l'échelle régionale, à l'échelle d'un site NATURA 2000 et d'un site local (Tab. 8).

Tableau 8 : Estimation des coûts associés à différentes échelles de cartographie.

| Type de cartographie | Liste des actions | Coût total |
|--|--|-------------------|
| -Analyse bibliographique -Photographies aériennes/satellite -Sonar latéral ou sondeur multifaisceaux -Vérités terrain (vidéo remorquée et plong sous-marine -Interprétation et numérisation des données -Restitution cartographique au 1 :25.000 | | 450 à 600 000 € |
| | | |
| Site NATURA 2000 – 1 000 ha | -Analyse bibliographique -Photographies aériennes -Sonar latéral ou sondeur multifaisceaux -Vérités terrain (vidéo remorquée et plongée sous-marine -Interprétation et numérisation des données -Restitution cartographique du 1:5.000 au 1:10.000 | 50 000 à 70 000 € |
| | | |
| Echelle locale (aménagement portuaire) – 10 à 20 ha | -Analyse bibliographique -Photographies aériennes -vérités terrain (plongée sous-marine) -Interprétation et numérisation des données -Restitution cartographique au 1:1.000 au 1:5.000 | 10 000 à 20 000 € |

Ces éléments de budgets correspondent à des fourchettes de coûts généralement observés, ils ne tiennent pas compte des éventuelles spécificités des secteurs à couvrir.

8 Conclusions

Au sein du programme Interreg IIIB / Posidonia, le groupe de travail cartographie avait pour objectifs affichés de mettre en cohérence et harmoniser les démarches visant à réaliser des cartographies répondant aux attentes des gestionnaires de l'environnement.

Les informations rassemblées dans le rapport de ce groupe de travail sont le fruit d'une synthèse concertée entre les différents partenaires, que ce soit sur le plan de la compilation des données existantes ou celui de la validation des outils de cartographie retenus à l'occasion des campagnes océanographiques. Cette validation a permis notamment d'harmoniser une méthodologie de cartographie qui pourra être prise en compte par les gestionnaires en charge de la protection de l'environnement marin, dans les cadres de gestion existants (Natura 2000, DCE) ou à venir (aires marines protégées) qui, toutes, nécessitent d'avoir une bonne représentation cartographique des biocénoses benthiques et notamment de l'herbier de posidonies, situé au premier rang des thématiques étudiées et cartographiées en Méditerranée.

Les aspects innovants de cette étude résident dans l'effort de standardisation des produits cartographiques de sortie, fonction de l'échelle choisie, et donc du ratio précision – étendue, et bien sûr des méthodes (acoustiques, optiques, aériennes, plongées) nécessaires à leur mise en œuvre. La réflexion a également porté sur la charte graphique. Ces aspects innovants viennent parfaitement compléter le guide de surveillance de l'herbier, rédigé par le groupe de travail idoine.

C'est cet effort de mise en commun d'une expérience de terrain, d'harmonisation des produits de sortie, qui permettra aux collectivités territoriales de disposer d'informations opérationnelles, d'un support de qualité, scientifiquement validé. Le support réalisé leur permettra d'avoir en main les éléments techniques les aidant - en fonction des objectifs recherchés — à évaluer l'emprise, et « l'état de santé » de l'herbier de posidonie, en vue d'œuvrer dans leurs actions patrimoniales de protection de la biodiversité et de développement durable. Il fournit en ce sens des indications sur les techniques à mettre en œuvre et sur les coûts associés. C'est en ce sens que ce document doit être considéré comme un système d'aide à la décision.

Nous terminerons ce rapport du groupe de travail cartographie en précisant que l'ensemble des indicateurs, qu'ils soient de réalisation, de résultat ou d'impact ont tous été atteints. Une synthèse de ces informations et leur adéquation avec les objectifs affichés, est repris dans le rapport de synthèse final du programme « Posidonia ».

9 Bibliographie

ASTIER J.M., 1972. Régression de l'herbier de posidonies en rade des Vignettes à Toulon. *Ann. Soc. Sci. nat. Archéol. Toulon Var.* 24: 97-103.

AUGIER H., 1995. Etude et cartographie des peuplements benthiques de l'île de Porquerolles (Méditerranée, France). III. Transect permanent et cartographie biocénotique des Gorges du Loup, île de Porquerolles (Var, S.E., France). Sci. Rep. Port-Cros nation. Park, 16: 115-122.

AUGIER H., BOUDOURESQUE C.F., 1976. Végétation marine de Port-Cros (Parc national). XIII. Documents pour la carte des peuplements benthiques. Trav. sci. Parc nation. Port-Cros, 2: 9-22 + pl.

AUGIER H., BOUDOURESQUE C.F., 1967. Végétation marine de l'île de Port-Cros (Parc national). I. La baie de La Palud. *Bull. Mus. Hist. nat. Marseille*, 27: 93-124.

AUGIER H., BOUDOURESQUE C.F., 1970a. Végétation marine de l'île de Port-Cros (Parc National). VI. Le récif-barrière de Posidonies. *Bull. Mus. Hist. nat. Marseille*, 30: 221-228 + 1 pl. h.t.

AUGIER H., BOUDOURESQUE C.F., 1970b. Végétation marine de l'île de Port-Cros (Parc National). V. La baie de Port-Man et le problème de la régression de l'herbier de Posidonies. *Bull. Mus. Hist. nat. Marseille*, 30: 145-164 + 1 pl. h.t.

AUGIER H., GILLES G., RAMONDA G., 1984. L'herbier de *Posidonia oceanica* et la pollution par le mercure sur le littoral des Bouches-du-Rhône et du Var (France). *In*: Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. edits. *International Workshop on Posidonia oceanica beds*, GIS Posidonie publ., Fr., 1: 399-406.

AUGIER H., NIERI M., 1988. Cartographie, balisage et dynamique du récif-barrière à *Posidonia* oceanica de la baie de Port-Cros (Parc national). *Sci. Rep. Port-Cros natl. Park*, 14: 29-40 + 1 pl. h.t.

BELLAN-SANTINI D., 1964. Influence de la pollution sur quelques peuplements superficiels de substrat rocheux. In: Symp. Pollut. Mar. Microorgan. Prod. pétrol. CIESM publ., Monaco: 127-131.

BELLONE E., MEINESZ A., 1995. Cartographie sous-marine du Parc national de Port-Cros (Var, France). Elément de cartographie de l'herbier de *Posidonia oceanica* de la baie de Port-Man. Sci. Rep. Port-Cros nation. Park, 16: 123-128.

BELSHER T., HOULGATTE E., 2000. Etude des sédiments superficiels marins, des herbiers à phanérogames et des peuplements à *Caulerpa taxifolia* de Menton au Cap d'Ail. Ifremer publ., Brest: 44 pp + 3 maps.

BELSHER T., LOUBERSAC L., BELBEOCH G., 1985. Remote sensing and mapping. In: Handbook ofphycological methods. Ecological field methods: macroalgae, Littler M., Littler D.S. (eds), University Press publ., Cambridge: 177-197.

BELSHER T., MEINESZ, A., LEFEVRE, J.R., BOUDOURESQUE, C.F., 1988. Simulation of SPOT satellite imagery for charting shallow-water benthic communities in the Mediterranean. P.S.Z.N. Marine Ecology, 9: 157-165.

BERNARD G., BONHOMME, P., RUITTON, S., ESCOFFIER, B., CADIOU, G., 2000. Caractérisation de l'herbier à *Posidonia oceanica* supérieur dans l'anse du rouet (commune de Carry-le-Rouet, Bouches-du-Rhône). SOGREAH and GIS Posidonie publ., Marseille : 28 pp.

BERNARD G., DENIS J., BONHOMME P., EMERY E., CADIOU G., CHARBONNEL E., HERVE G., BOUDOURESQUE C.F., 2003a. Cartographie des biocénoses marines entre la Tour Fondue et l'île

de Porquerolles. Alimentation en eau potable de l'île de Porquerolles. Rapport de synthèse final. Ville de Hyères-les-Palmiers, GIS Posidonie and Ifremer, GIS Posidonie publ., Marseille : 60 pp.

BERNARD G., DENIS J., CADIOU G., BONHOMME P., CLABAUT P., GANTEAUME A., ANDRAL B., EMERY E., 2003a. Etude du patrimoine marin environnant les domaines départementaux de l'Île Verte et du Mugel. Phase II, Diagnostic. Contrat Conseil Général 13, GIS Posidonie and Ifremer, GIS Posidonie publ., Marseille.

BIANCHI C.N., PEIRANO A., 1995. Atlante delle Fanerogame marine della Liguria. *Posidonia oceanica* e *Cymodocea nodosa*. Centro Ricerche Ambiente Marino, ENEA publ., La Spezzia, Ital.: 1-146

BIANCONI C.H., BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., DI SANTO F., 1987. Cartographie de la répartition de *Lithophyllum lichenoides* (Rhodophyta) dans la réserve naturelle de Scandola (côte orientale de Corse, Méditerranée). Trav. sci. Parc nat. rég. Réserves nat. Corse, 13: 39-63.

BLANC J.J., 1975. Recherches de sédimentologie appliquée au littoral rocheux de la Provence. Aménagement et protection. Centre nation. Exploit. Océans publ., Fr.: 1-164 + 32 pl. h.t.

BLANC J.J., JEUDY DE GRISSAC A., 1978. Recherches de géologie sédimentaire sur les herbiers à Posidonies du littoral de la Provence. Contrat CNEXO 76/4043, 77/4074. Centre nation. Exploit. Océans publ., Fr.: 1-185, i-vii, 42 pl. h.t.

BLANPIED C., BUROLLET P.F., CLAIREFOND P., SHIMI M., 1979. Sédiments actuels et holocènes. La mer pélagienne, étude sédimentologique et écologique du plateau tunisien et du Golfe de Gabès. *Ann. Univ. Provence*, Fr., 6(1): 61-82.

BONHOMME P., BERNARD G., CHARBONNEL E., CADIOU G., LERICHE A., ANGLES D'ORTOLI N., LE DIREAC'H L., DENIS J., DENEUX F., HERVE G., EMERY E., CLABAUT P., 2003. Guide méthodologique pour la cartographie des biocénoses marines. Volet n°1: l'herbier à *Posidonia oceanic*a. Notice technique. Ifremer and Gis Posidonie publ, Marseille: 86 pp.

BOUDOURESQUE C.F., BANCONI C.H., 1986. Posidonies profondes dans le coralligène de Sulana. *Trav. sci. Parc nat. rég. Rés. nat. Corse*, 2: 36-39.

BOUDOURESQUE C.F., CHARBONNEL E., MEINESZ A., PERGENT G., PERGENT-MARTINI C., CADIOU G., BERTRANDY M.C., FORET P., RAGAZZI M., RICO-RAIMONDINO V., 2000. A monitoring network based on the seagrass *Posidonia oceanica* in the nortwestern Mediterranean Sea. *Biol. mar. medit.*, 7(2): 328-331.

BOUDOURESQUE C.F., JEUDY DE GRISSAC A., MEINESZ A., 1985a. Un nouveau type d'herbier à *Posidonia oceanica* : l'herbier de colline. *Rapp. P.V. Réun. Commiss. internation. Explor. sci. Médit.*, 29(5): 173-175.

BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., 1982. Découverte de l'herbier de Posidonie. *Cah. Parc nation. Port-Cros.*, Fr., 4: 1-79.

BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., LEFÈVRE J.R., 1985b. Cartographie des peuplements benthiques marins de Corse. I. La formation récifale à *Posidonia oceanica* de Saint-Florent. *Ann. Inst. océanogr.*, 61(1): 27-38.

BOUDOURESQUE C. F., LERICHE A., BERNARD G., BONHOMME P., 2006. Mapping marine vegetation distribution: an overview, actes du deuxième symposium méditerranéen sur la végétation marine, RAC/SPA publ. (Athènes , 12- 13 décembre 2003) : 21-33.

CALVO S., FRADA ORESTANO C., 1984. L'herbier à *Posidonia oceanica* des côtes siciliennes: les formations récifales du Stagnone. In: International Workshop on *Posidonia oceanica* beds, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. (eds.), GIS Posidonie publ., Marseille, 1: 29-37.

- CHARBONNEL E., BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., PERGENT-MARTINI C., RICO-RAIMONDINO V., BERTRANDY M.C., FORET P., RAGAZZI M., LECCIA G., 1995. Le Réseau de Surveillance Posidonies de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Rapport 1994 (4° phase, 1° année). GIS Posidonie publ., Fr.: 1-167.
- CHARBONNEL E., BONHOMME P., BERNARD G., GRAVEZ V., 1996. Etude des herbiers de posidonies et autres types de fonds de la quatrième anse du Mourillon au Cap Brun et de la Grande Jetée au Port Saint-Louis (Toulon, Var). Ville de Toulon, Direction Urbanisme & GIS Posidonie. GIS Posidonie publ., Fr.: 1-103.
- CHARBONNEL E., BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., BERNARD G., BONHOMME P., PATRONE J., KRUCZEK R., COTTALORDA J.M., BERTRANDY M.C., FORET P., RAGAZZI M.., LE DIREAC'H L., 2000. Le Réseau de Surveillance Posidonies de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Première partie : présentation et guide méthodologique. Année 2000. Région PACA, Agence de l'Eau RMC, GIS Posidonie, CQEL 13, CQEL 83, Conseil Général 06, GIS Posidonie publ. : 1-76.
- CINELLI F., PARDI G., PAPI I., BENEDETTI CECCHI L., PROIETTI ZOLLA A., PADULA F., ACUNTO S., CASTELLAZZI M., AIROLDI L., ABBIATI M., 1992. Mappatura delle praterie di *Posidonia oceanica* (L.) Delile intor no alle isole minoridell'Arcipelago toscano. Centro universitario di Biologia marina di Livorno publ.: 145 pp + 8 maps.
- CLARISSE S., 1984. Apport de différentes techniques cartographiques à la connaissance de l'autoécologie de *Cystoseira balearica* Sauvageau, macroalgue marine dominante dans la région de Calvi (Corse). Lejeunia, N.S., 113: 1-24 + 2 maps.
- COLANTONI P., GALLIGNANI P., FRESI E., GNELLI F., 1982. Patterns of *Posidonia oceanica* (L.) Delile beds around the island of Ischia (Gulf of Naples) and adjacent waters. *Mar. Eco.y PSZNI* 3 (1): 53-74 + 2 cartes.
- CRISTIANI G., 1980. Biomasse et répartition de l'herbier de *Posidonia oceanica* de la Côte Bleue (B. d. Rh. France) et pollution marine par les métaux lourds. Thèse Doct. 3° Cycle, Univ. Aix-Marseille 3, Fr.: 1-150 + ix pp + 1 carte h.t.
- CUVELIER M., 1976. Surveillance en temps réel de l'évolution des herbiers : nouvelle méthode de recensement des herbiers par cartographie au sonar latéral. In: 3° Journées Etudes Pollutions, CIESM publ., Monaco: 191-193.
- DENIS J., BERNARD G., BOUDOURESQUE C.F., CHARBONNEL E., BELSHER T., EMERY E., DENEUX F., CLABAUT P., 2001. Etude et cartographie des biocénoses de la rade de Toulon. Rapport méthodologique. Syndicat intercommunal de l'Aire toulonnaise, IFREMER & GIS Posidonie, IFREMER publ., Fr.: 1-245.
- DENIS J., HERVÉ G., DENEUX F., SAUZADE D., BONHOMME P., BERNARD G., BOUDOURESQUE C.F., LERICHE A., CHARBONNEL E., LE DIREAC'H L., 2003. Guide méthodologique pour la cartographie des biocénoses marines. Volet N°1 : l'herbier à *Posidonia oceanica*. Guide méthodologique. Agence de l'Eau, Région Provence Alpes-Côte d'Azur et DIREN PACA. IFREMER, GIS Posidonie & Centre d'Océanologie de Marseille, GIS Posidonie publ.: 1-93.
- DIVIACCO G., SPADA E., VIRNO-LAMBERTI C., 2001. Le fanerogame marine del Lazio. Descrizione e cartografia delle praterie di *Posidonia oceanica* e dei prati di *Cymodocea nodosa*. ICRAM publ., Ital.: 1-113 + 14 cartes h.t.
- EL ASMI S., RAIS C., RHOMDHANE M.S., EL HERRY S., 2003. Cartographie du récif-barrière de posidonies de la baie de Sidi Raïs (côtes nord-orientales de la Tunisie). In: Second Mediterranean symposium on marine vegetation, Athens 12-13 December 2003, Abstracts, Regional Activity Center for Specially Protected Areas publ., Tunis: 13.
- EL ASMI-DJELLOULI Z., DJELLOULI A.S., ABDELJAOUED S., 2000. Présentation des herbiers de la baie de Monastir (Tunisie). *Proceedings of the first Mediterranean symposium on marine vegetation.* RAC/SPA publ., Tunis: 132-135.

ERHROLD A., 2003. Cartographie des peuplements macro-benthiques par les méthodes acoustiques en domaine subtidal, IFREMER DEL/EC, REBENT publ., 19p.

FRANCOUR P., MARCHADOUR M., 1989. Les fonds marins, et en particulier l'herbier à *Posidonia oceanica*, aux alentours du port de la Pointe Rouge (Marseille). Ville de Marseille & GIS Posidonie. GIS Posidonie publ., Fr.: 1-48.

FREDJ G., MEINARDI M., PIERROT S., ROY P., 1990. Cartographie par le satellite Spot 1 de communautés benthiques littorales en Méditerranée occidentale. Bull. Inst. océanogr., spec. issue 6: 71-85.

GANZIN N., BERNARD G., SIMON B., 2006. Cartographie dynamique des herbiers de magnoliophytes marines – *In*: Apport des données du satellite SPOT5 aux études environnementales de la zone du delta du Rhône et de l'étang de Berre (Etude CNES/IFEN « Littoral Provençal »). IFRE PMSE – CEREGE – Europôle méditerranéen de l'Arbois – BP 80 – 13545 Aix en Provence Cedex 4.

GLOUX B., 1984. Méthodes acoustiques et informatiques appliquées à la cartographie rapide et détaillée des herbiers. In: International Workshop on *Posidonia oceanica* beds, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. (eds.), GIS Posidonie publ., Marseille, 1: 45-48.

HOAREAU A., 1988. Cartographie des végétaux marins par images SPOT. Presqu'île de Giens. Mémoire Dipl. Etudes supérieures spécialisées, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris: 28 pp + 22 pl. + 23 unnumbered pp.

JAUBERT J.M., CHISHOLM J.R.M., DUCROT D., RIPLEY H.T., ROY L., PASSERON-SEITRE G., 1999. No deleteriousalterations in *Posidonia* beds in the bay of Menton (France) eight years after Caulerpa taxifolia colonization. J. Phycol., 35: 1113-1119.

LEFÈVRE J.R., VALERIO C., MEINESZ A., 1984. Optimisation de la technique de la photographie aérienne pour la cartographie des herbiers de Posidonies. *In*: Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. edits. *International Workshop on Posidonia oceanica beds*, GIS Posidonie publ., Fr., 1: 49-55.

LERICHE A., BOUDOURESQUE C.F., BERNARD G., BONHOMME P., DENIS J., 2004. A one century suite of seagrass bed maps: can we trust ancient maps? *Est. Coast. Shelf Sci.* 59: 353-362.

LERICHE-GUICHARD A., 2001. Mise en place d'un outil de surveillance de l'herbier à *Posidonia oceanica* (L.) Delile: le SIG Posidonie. Application à la Côte Bleue (B.d.R., Fr.). Mémoire Diplôme d'Etudes approfondies en Biosciences de l'Environnement, Chimie et Santé, Univ. Aix-Marseille II, Fr.: 1-45.

LOQUES F., BELLONE E., MEINESZ A., VILLETTE M., 1995. Cartographie sous-marine du Parc national de Port-Cros (Var, France). II. La zone protégée de la baie de La Palud. Sci. Rep. Port-Cros nation. Park, 16: 129- 133 + 1 map.

MARION A.F., 1883. Esquisse d'une topographie zoologique du golfe de Marseille. *Ann. Mus. Hist. nat. Marseille*, Fr., 1: 6-108 + 1 carte.

McKENZIE L.J., FINKBEINER M.A., KIRKMAN H., 2001. Methods for mapping seagrass distribution. *In*: Short F.T., Coles R.G. edits. *Global seagrass research methods*. Elsevier publ., Amsterdam: 101-121.

MEINESZ A., BOUDOURESQUE C.F., BIANCONI C.H., SIMONIAN M., 1987. Cartographie de la limite inférieure de l'herbier de posidonies de la baie d'Elbo. *Trav. sci. Parc nat. rég. Rés. nat. Corse* 13: 27-37.

MEINESZ A., BOUDOURESQUE C.F., LEFEVRE J.R., 1988. A map of the *Posidonia oceanica* beds of marina d'Elbu (Corsica, Mediterranean). P.S.Z.N Marine Ecology, 9: 243-252.

MEINESZ A., BOUDOURESQUE C.F., VAUGELAS J. DE, CHIAVERINI D., 1998. Carte des biocénoses sous-marines de la baie d'Elbo (réserve naturelle de Scandola). Trav. sci. Parc nat. rég. Réserves nat. Corse, 57: 163-169.

MEINESZ A., COTTALORDA J.M., CHIAVERINI D., VAUGELAS J. de, 2001. Représentation cartographique de l'abondance de quelques algues et invertébrés du littoral de l'îlot Bagaud (Parc national de Port-Cros). *Sci. Rep. Port-Cros natl. Park* 18: 123-141.

MEINESZ A., CUVELIER M., LAURENT R., 1981. Méthodes récentes de cartographie et de surveillance des herbiers de phanérogames marines. Leurs applications sur les côtes françaises de la Méditerranée. *Vie Milieu* 31 (1): 27-34.

MEINESZ A., LAURENT R., 1982. Cartes de la végétation sous-marine des Alpes Maritimes (côtes françaises de la Méditerranée). I. Limite inférieure de l'herbier de *Posidonia oceanica* dans le Colfe Juan et à l'Est des îles de Lérins. Bull. Inst. Océanogr., 58 (1): 103-112.

MEINESZ A., LAURENT R., 1980. Cartes de la limite inférieure de l'herbier de *Posidonia oceanica* dans les Alpes-Maritimes (France). Campagne Poséidon 1976. *Ann. Inst. Océanogr.* 56(1): 45-54.

MEINESZ A., LEFEVRE J.R., 1984. Régénération d'un herbier à *Posidonia oceanica* quarante années après sa destruction par une bombe dans la rade de Villefranche (Alpes-Maritimes). *In*: Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. edits. *International Workshop on Posidonia oceanica beds*, GIS Posidonie publ., Fr., 1: 39-44.

MEINESZ A., LEFEVRE J.R., ASTIER J.M., 1991. Impact of coastal development on the infralittoral zone along the southern Mediterranean shore of continental France. *Mar. Poll. Bull.* 23: 343-347.

MEINESZ A., SIMONIAN M., 1983. Cartes de la végétation sous-marine des Alpes Maritimes (côtes françaises de la Méditerranée). II. la végétation mixte à *Cymodocea nodosa – Zostera noltii – Caulerpa prolifera* et la limite supérieure de l'herbier de *Posidonia oceanica* entre Juan-les-Pins et Golfe Juan. Bull. Inst. océanogr., 59 (1): 21-35.

MEINESZ A., VAUGELAS J. DE, CHIAVERINI D., BIALECKI K., COTTALORDA J.M., MOLENAAR H. 1999. Répartition cartographique de l'abondance de quelques algues et invertébrés du littoral de la réserve naturelle de Scandola (Corse). Laboratoire Environnement marin littoral, Nice University publ: 8 pp + 60 pl. + 1 table.

MOLINIER R., 1960. Etude des biocénoses marines du Cap-Corse. Vegetation 9: 121-312.

MOLINIER R., PICARD J., 1952. Recherches sur les herbiers de Phanérogames marines du littoral méditerranéen français. *Ann. Inst. océanogr.* 27(3): 157-234.

MOLINIER R., PICARD J., 1953. Notes biologiques à propos d'un voyage d'études sur les côtes de Sicile. *Ann. Inst. océanogr.* 28(4): 163-187 + 4 pl. h.t.

MOLINIER R., PICARD J., 1954. Eléments de bionomie marine sur les côtes de Tunisie. *Bull. Stat. Océanogr. Salammbô* 48: 3-47.

MOLINIER R., PICARD J., 1956. Aperçu bionomique sur les peuplements marins littoraux des côtes rocheuses méditerranéennes de l'Espagne. *Bull. Trav. publ. Stat. Aquic. Pêche Castiglione* 8: 251-268.

NIÉRI M., MEINESZ A., MOLENAAR H., SLOECK O., 1991. Réimplantation de la phanérogame *Posidonia oceanica* dans le golfe de Marseille (Bouches-du-Rhône). Ville de Marseille & GIS Posidonie publ., Fr.: 1-35.

PAILLARD M., GRAVEZ V., CLABAUT P., WALKER P., BLANC J.J., BOUDOURESQUE C.F., BELSHER T., URSCHELER F., POYDENOT F., SINNASSAMY, J.M., AUGRIS C., PEYRONNET J.P., KESSLER M., AUGUSTIN J.M., LE DREZEN E., PRUDHOMME C., RAILLARD J.M., PERGENT G., HOAREAU A., CHARBONNEL E., 1993. Cartographie de l'herbier de Posidonie et des fonds marins

environnants de Toulon à Hyères (Var, France). Reconnaissance par sonar latéral et photographie aérienne. Notice de présentation. Ifremer and GIS Posidonie publ., Marseille : 36 pp + 3 maps.

PASQUALINI V., 1997. Caractérisation des peuplements et types de fonds le long du littoral corse (Méditerranée, France). Thèse Doctorat, Corsica University: 190 pp.

PASQUALINI V., CLABAUT P., PERGENT G., BENYOUSSE L., PERGENT-MARTINI C., 2000. Contribution of side scan sonar to the management of Mediterranean littoral ecosystems. *Internat. J. Remote Sensing* 21(2): 367-378.

PASQUALINI V., PERGENT-MARTINI C., 1996. Monitoring of *Posidonia oceanica* meadows using image processing. In: Seagrass biology: proceedings international workshop, Kuo, Phillips, Walker, Kirkman (eds.), Australia: 351-358.

PASQUALINI V., PERGENT-MARTINI C., FERNANDEZ C., PERGENT G, 1997. The use of airborne remote sensing for benthic cartography: advantages and reliability. *International J. Remote Sensing* 18(5): 1167-1177.

PASQUALINI V., PERGENT-MARTINI C., PERGENT G., 1999. Environmental impacts identification along corsican coasts (Mediterranean sea) using image processing. *Aguat. Bot.* 65: 311-320.

PÉREZ-BLAYA E., GONZÁLEZ-REYEZ M., MARHUENDA-IRASTORZA M., ROMÁN-ECLAPEZ F., ALEMAÑ-LARROSA J.F., 2000. Cartografía de *Caulerpa taxifolia* en Porto Colom (Mallorca). Mediterraneo Servicios marinos and Govern Balear publ.: 9 pp + 4 maps + 6 pp.

PERGENT G., 1990. Lepidochronological analysis of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile: a standardized approach. *Aquat. Bot.* 37: 39-54.

PERGENT G., BOUDOURESQUE C.F., THÉLIN I., MARCHADOUR M., PERGENT-MARTINI C., 1991. Map of benthic vegetation and sea-bottom types in the harbour at Banyuls-sur-Mer (P.-O., France). *Vie Milieu* 41(2-3): 165-168.

PERGENT G., BOUDOURESQUE C.F., VADIER B., 1985. Etude préliminaire des herbiers à *Posidonia oceanica* (L.) Delile de la Côte des Albères (Pyrénées-Orientales, France). *Ann. Inst. océanogr.*, N.S., 61(2): 97-114.

PERGENT G., PERGENT C., 1985. Cartographie de l'herbier à *Posidonia oceanica* de la baie d'Urla-Iskele (Turquie). *Rapp. P.V. Réun. Commiss. internation. Explor. sci. Médit.* 29(6): 231-234.

PERGENT G., PERGENT-MARTINI C., BOUDOURESQUE C.F., 1995. Utilisation de l'herbier à *Posidonia oceanica* comme indicateur biologique de la qualité du milieu littoral en Méditerranée: état des connaissances. *Mésogée* 54: 3-29.

PERGENT-MARTINI C., PASQUALINI V., 2000. Seagrass population dynamics before and after the setting up of a wastewater treatment plant. *Biol. mar. Medit.* 7(2): 405-408.

PERGENT-MARTINI C., PERGENT G., 1990. Suivi de l'évolution de l'herbier à *Posidonia oceanica* après la mise en service de la station d'épuration de Marseille. LBMEB & GIS Posidonie, GIS Posidonie publ., Fr.: 1-58.

PERGENT-MARTINI C., PERGENT G., FERNANDEZ C., FERRAT L., 1999. Value and use of *Posidonia oceanica* as a biological indicator. *In: Land-ocean interactions: managing coastal ecosystems*. Proc. MEDCOAST 99 - EMECS 99 Joint Conference. MEDCOAST, Middle East Technical Univ. Publ, Turkey, 1: 73-90.

PIAZZI L., BALESTRI E., BALATA D., CINELLI F., 2000. Pilot transplanting experiment of *Posidonia oceanica* (L.) Delile to restore a damaged coastal area in the Mediterranean Sea. *Biol. mar. Medit.* 7(2): 409-411.

PIAZZI L., BALESTRI E., CINELLI F., 1996. Mappatura e monitoraggio di una prateria a *Posidonia oceanica*(L.) Delile situata a Sud di Livorno (Toscana, Italia). G. bot. ital., 28 (1): 67-77.

PICARD J., 1965. Recherches qualitatives sur les biocoenoses marines des substrats meubles dragables de la region marseillaise. Thèse Doct., Univ. Aix-Marseille II, Fr.: 1-160 + 1 carte.

PRUVOT G., 1894. Essai sur la topographie et la constitution des fonds sous-marins de la région de Banyuls-sur-Mer, de la plaine du Roussillon au golfe de Rosas. *Arch. Zool. exp. gén.* 3: 599-672.

RAMOS-ESPLÁ A.A., 1984. Cartografía de la pradera superficial de *Posidonia oceanica* en la Bahía de Alicante (SE, España). *In*: Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. edits. *International Workshop on Posidonia oceanica beds*, GIS Posidonie publ., Fr., 1: 57-61.

RIVEILL S., DJEBO H., HAMRIT R., EL ABED A., 2003. Caractérisation de faciès rares d'herbiers à Posidonies: les microatolls de la lagune d'El Biban. In: Second Mediterranean symposium on marine vegetation, Athens 12-13 December 2003, Abstracts, Regional Activity Center for Specially Protected Areas publ., Tunis: 34.

10 Liste des annexes

ANNEXE GT Carto1 : Comptes rendus et présentations lors des séminaires :

- a. Détails du déroulement du séminaire de Marseille 12-13 Juillet 2005.
- b. Détails du déroulement du séminaire de mi-parcours de Gênes 21-23 juin 2006.
- c. Détails du déroulement du séminaire de clôture de Marseille 26-27 mars 2007.

ANNEXE GT Carto2: Le Système Informatif INTERREG IIIb POSIDONIA (ENEA)

ANNEXE GT Carto3 :Rapport du site atelier de Saint Raphaël. du 27/11/05 au 1/12/05 et du 13/06/06.

ANNEXE GT Carto4 : Détails du déroulement de la mission d'Imperia du 02 au 05 mai 2006.

ANNEXE GT Carto5 : Imagerie Satellite à Très Haute Résolution (THR) pour la cartographie de la limite supérieure des herbiers. Comparaison à la photographie aérienne (aéroportée et drones).

ANNEXE GT Carto6 : Comparaison des informations recueillies à l'aide du sonar latéral et en plongée sur les sites de Boulouris et du Pic d'Aurel.

ANNEXE GT Carto7 : Confrontation des données sonar, GIB et vidéo sur la limite inférieure de l'herbier (Site de la Pointe des Lions) par Philippe Clabaut.