

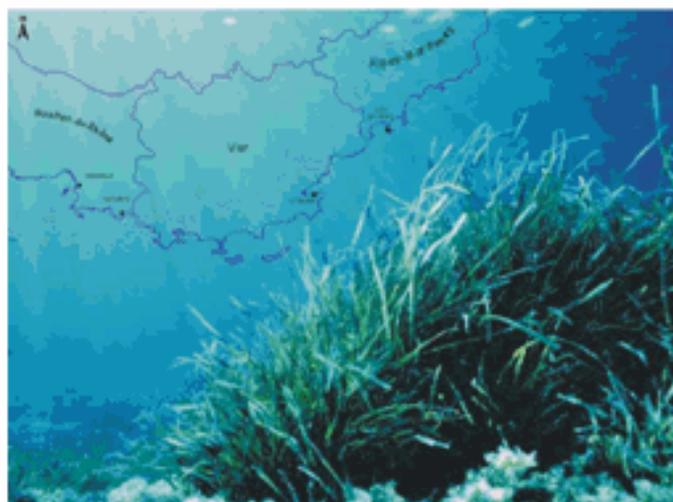


février 2003

Cartographie des biocénoses marines

Volet n°1 : l'herbier à *Posidonia oceanica*

Guide méthodologique



Guide méthodologique pour la cartographie des biocénoses marines

Volet n°1 : l'herbier à *Posidonia oceanica*

Auteurs/intervenants :

- J. Denis, G. Hervé, F. Deneux, D. Sauzade, laboratoire côtier Ifremer, Toulon
- P. Bonhomme, G. Bernard, Ch. F. Boudouresque, A. Leriche, E. Charbonnel, L. Le Direac'h, GIS-Posidonie, Marseille

Contacts :

Ifremer - Centre de Méditerranée

Jacques Denis, BP 330, 83507 La Seyne sur Mer cedex

Tel : 04-94-30-48-20, Fax : 04-94-30-64-17

e-mail : jacques.denis@ifremer.fr

Centre Océanologique de Marseille

Charles François Boudouresque, parc scientifique et technologique de Luminy, Case 901, 13288 Marseille cedex 09

Tel : 04-91-82-91-30

e-mail : boudour@com.univ-mrs.fr

GIS-posidonie

Patrick Bonhomme, parc scientifique et technologique de Luminy, Case 901, 13288 Marseille cedex 09

Tel : 04-91-82-96-20, fax : 04-91-41-12-65

e-mail : patrick.bonhomme@com.univ-mrs.fr

Partenaires financeurs :

- Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse,
- Conseil Régional PACA,
- DIREN PACA,

Nous tenons plus particulièrement à remercier P. Boissery, V. Raimondino et N. Quelin.

Par ailleurs, nous remercions les différents participants à cette étude, notamment Philippe Clabaut, géomorphologue marin, spécialisé dans l'interprétation des sonogrammes (sonar latéral) et, aussi, tout particulièrement l'équipe du Parc Marin de la Côte Bleue (Bachet F., Geoffray C., Daniel B., De Maisonneuve L.), pour leur contribution aux missions de terrain sur le site atelier de la Côte Bleue.



AVANT PROPOS.....	5
INTRODUCTION	6
1 PRESENTATION DE L'HERBIER A POSIDONIA OCEANICA	9
1.1 TRAITES D'HISTOIRE DE VIE DE <i>POSIDONIA OCEANICA</i>	9
1.2 L'EDIFICATION DES HERBIERS	10
1.3 LES DIFFERENTS TYPES D'HERBIER	11
1.4 FLORE ET FAUNE ASSOCIEE	14
2 ETAT DE L'ART DE LA CARTOGRAPHIE DE L'HERBIER	17
3 STRATEGIE ADOPTEE POUR LA CARTOGRAPHIE DE L'HERBIER DE POSIDONIE.....	26
4 DONNEES NECESSAIRES A LA CARTOGRAPHIE.....	29
4.1 DONNEES CARTOGRAPHIQUES ISSUES DE LA BIBLIOGRAPHIE	29
4.2 INDICE DE FIABILITE DES DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES	30
4.3 DONNEES SONAR LATERAL.....	35
4.3.1 Principe de fonctionnement	35
4.3.2 Caractéristiques techniques	35
4.3.3 Mise en oeuvre	36
4.3.4 Caractéristiques des données	37
4.3.5 Interprétation des données.....	38
4.4 DONNEES PHOTOGRAPHIES AERIENNES	39
4.4.1 Principe et caractéristiques techniques	39
4.4.2 Mise en oeuvre	40
4.4.3 Caractéristiques des données	41
4.4.4 Interprétation des données.....	43
4.5 DONNEES ACQUISES EN PLONGEE SOUS-MARINE	44
4.5.1 Vérités terrain	45
4.5.2 Etat de vitalité et dynamique de l'herbier.....	45
4.5.2.1 Mesure de la densité de l'herbier	46
4.5.2.2 Mesure du déchaussement des rhizomes	47
4.5.2.3 Pourcentage de rhizomes plagiotropes	48
4.5.2.4 Estimation du recouvrement de l'herbier	49
4.5.2.5 Evaluation de la dynamique de l'herbier de posidonie.....	50
4.5.2.6 Faune et flore associées.....	51
4.5.3 Caractéristique des données	52
5 ELABORATION DU SIG ET DES CARTES	53
5.1 METHODE GENERALE DE CONSTRUCTION DES CARTES	53
5.2 ELABORATION DE L'INFORMATION GEOGRAPHIQUE.....	55
5.2.1 Répartition spatiale de l'herbier.....	55
5.2.2 Dynamique de l'herbier	56
5.3 PRINCIPES DE COHERENCE.....	57
5.3.1 Cohérence thématique	57
5.3.2 Cohérence géographique.....	57
5.3.3 Cohérence informatique.....	58
5.3.4 Cohérence de qualité de l'information	58
5.4 LES OUTILS	59
5.5 LES SPECIFICATIONS.....	59
5.5.1 positionnement et référentiel géographiques	60
5.5.2 organisation de la base de données	64

sommaire

5.5.3	<i>création d'information géographique</i>	65
5.5.4	<i>production cartographique</i>	66
5.5.5	<i>logiciels et matériels informatiques</i>	68
6	STATUTS DES DONNEES	69
6.1	DONNEES EXISTANTES	69
6.2	DONNEES PRODUITES	70
7	ELEMENTS D'UN CAHIER DES CHARGES POUR LA CARTOGRAPHIE DE L'HERBIER DE POSIDONIE	72
7.1	ACQUISITION DES DONNEES	72
7.1.1	<i>bibliographie</i>	72
7.1.2	<i>sonar latéral</i>	72
7.1.3	<i>photographie aérienne</i>	73
7.1.4	<i>plongée</i>	73
7.2	TRAITEMENT DES DONNEES.....	73
7.2.1	<i>analyse bibliographique</i>	73
7.2.2	<i>sonar latéral</i>	73
7.2.3	<i>photographies aériennes</i>	73
7.2.4	<i>plongée</i>	74
7.3	CARTOGRAPHIE.....	74
	LISTE DES FIGURES	80
	LISTE DES TABLEAUX	81
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	82
	GLOSSAIRE	92
	ABREVIATIONS	94

Avant propos

La gestion de la zone côtière fait l'objet de préoccupations grandissantes qui n'échappent pas aux institutions régionales. En l'occurrence, pour la région Provence Alpes Côte d'Azur, la prise de conscience des enjeux environnementaux et économiques, dont ce territoire fait l'objet, a amené ses gestionnaires à s'engager dans une démarche basée sur une forte prise en compte de la valeur patrimoniale de cet espace. Le principe qui prévaut dans la conduite d'une telle démarche est de développer et de détenir une base de connaissance et, à terme, une base de données suffisante sur les ressources de l'espace littoral régional. Il s'agit, en l'occurrence, des biocénoses marines du milieu proche côtier, parmi lesquelles se trouve en bonne place l'herbier de *Posidonia oceanica*.

Cette perspective a conduit les institutions que sont l'Agence de l'Eau RMC, le Conseil Régional PACA et la DIREN PACA, à soutenir un programme de reconnaissance des biocénoses marines et d'élaboration d'un système régional d'information et d'aide à la décision. A cette fin, sur co-financement de ces trois institutions complétée par une participation de l'Ifremer et du COM, une première reconnaissance de grande ampleur des fonds côtiers au moyen d'un sonar latéral a eu lieu en juillet 2000 (POSICART 2000) sur un secteur allant de Fos-sur-mer à Hyères. Ces données entrent dans le processus de cartographie des biocénoses et, en particulier, de l'herbier de posidonie. Ce travail, et la suite qui en est donnée au travers du présent ouvrage, a été confié à des équipes de l'Ifremer et du GIS-Posidonie, pour leurs compétences et expertise relatives en biologie marine dédiée aux herbiers et en technologies de l'information géographique et de gestion des données.

Afin d'inciter les collectivités territoriales côtières à procéder à la cartographie de leur patrimoine côtier, l'Agence de l'Eau RMC, le Conseil Régional et la DIREN PACA ont suscité la réalisation d'un guide destiné à les y aider. Il concerne, dans un premier temps, l'herbier de posidonie (volet n°1).

Ce type d'action s'inscrit dans une démarche plus globale et intégrée de suivi du milieu côtier et de gestion des eaux. Il s'agit du Réseau Littoral Méditerranéen¹, qui fait figure de réseau de réseaux dont fait partie le Réseau de Surveillance Posidonie (Charbonnel *et al.*, 2000). Une telle initiative a pour intérêt de fédérer et d'optimiser tous les efforts consacrés à l'évaluation de la qualité du milieu littoral en vue d'assurer sa préservation de manière durable. L'instrument majeur de planification qui sert de toile de fond à ces actions est le SDAGE, appliqué au bassin Rhône Méditerranée Corse.

¹ Voir charte sur le site web du Réseau de Bassin (<http://www.rdb.eaurmc.fr>)



Introduction

L'herbier de Posidonie est l'écosystème le plus emblématique de la Méditerranée.

Posidonia oceanica est à la fois espèce-clé et ingénieur d'écosystèmes marins qui fait que l'herbier joue un **rôle écologique et économique** majeur en Méditerranée. Reconnu de longue date, ce rôle s'est traduit au plan réglementaire par l'instauration d'un statut de protection de *P. oceanica*. Cette espèce est par conséquent **protégée par la loi** en France et dans plusieurs autres pays ; par l'arrêté du 19 juillet 1988, dans le cadre de la Loi du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature. Les herbiers sont également pris en considération, en tant que biotope, dans le décret d'application de la "Loi Littoral" n°86.2 du 3 janvier 1986, figurent dans la " Directive Habitats " de l'Union Européenne du 21 mai 1992, et apparaissent dans les annexes des Conventions de Barcelone et de Berne.

A ce titre, l'herbier de Posidonie fait l'objet d'une attention toute particulière pour sa connaissance et, plus récemment, pour sa représentation cartographique aussi complète que possible.

Plusieurs grandes questions se posent à ce sujet, d'un abord délicat de par sa dimension, quant à savoir ce qui est réellement cartographiable parmi les paramètres qui caractérisent l'herbier tant dans ses structures que dans son fonctionnement, des données proprement dites qui sont nécessaires pour exprimer ces caractéristiques et les moyens associés pour les acquérir et, enfin des méthodes adaptées à utiliser pour traiter ces données afin de les restituer sous forme de cartes. Autant de questions dont les réponses constituent le contenu de cet ouvrage.

La carte est devenue de nos jours, un instrument indispensable, voire incontournable, au service de la gestion des territoires. En effet, elle est le meilleur support et vecteur de l'information attendue par les utilisateurs et gestionnaires des espaces, notamment littoraux. De plus, la forme sous laquelle l'information géographique est configurée et restituée permet de répondre avec acuité et pertinence à leurs attentes, comme le suivi de l'état et les tendances d'évolution de l'herbier de Posidonie. La maîtrise du processus de cartographie de cet élément fondamental et vital de l'écosystème côtier méditerranéen représente un enjeu majeur pour l'exercice de leurs missions. Il est donc essentiel de formaliser les modalités de mise en œuvre d'un tel processus et de le diffuser largement auprès des intéressés potentiels, de façon à procéder dans ce domaine, d'une façon exhaustive et homogène au niveau régional.

L'opération menée dans ce cadre régional est directement focalisée sur la thématique de l'herbier de posidonie. Il s'agit, en effet, de consacrer les efforts à la mise au point et la formalisation sous forme cartographique de l'information relative à cette thématique.



Cela signifie que, à ce stade, les autres thématiques, relatives aux autres biocénoses ne seront pas prises en compte. Elles feront l'objet des mêmes développement et application, lors d'une phase ultérieure du programme. Pour ce qui concerne les moyens mis en œuvre, des choix ont également été pris vers ceux qui présentent le meilleur compromis entre les résultats et les investissements. En effet, les moyens d'investigations du milieu marin côtier sont nombreux et présentent tous des avantages et des inconvénients qui, pour certains, peuvent être rédhibitoires, comme, par exemple, leur facilité, voire le coût, de mise en œuvre. Aussi, dans le cas présent, la stratégie adoptée fait-elle appel, aux levés par sonar latéral associés aux photographies aériennes et aux plongées sous marines.

La problématique que soulève la cartographie de l'herbier comporte plusieurs aspects touchant à de nombreux domaines, tant scientifiques que techniques, qui nécessitent des compétences et des outils spécialisés. Les diverses applications réalisées localement (Port Cros, Cap d'Ail à Menton, grande rade de Toulon, presqu'île de Giens, etc.), des plus récentes au plus anciennes, ont toutes montré la complexité de ce type d'opération.

Une **action pilote** en la matière s'est donc avérée indispensable pour proposer aux gestionnaires et futurs opérateurs, une démarche type qui réponde à cette problématique en fournissant les moyens de satisfaire les besoins régionaux. La réponse est de proposer un **guide**, à caractère méthodologique, destiné à les aider dans leur démarche de gestionnaires, en leur offrant le cadre scientifique et technique suffisant pour mener à bien la cartographie de l'herbier de posidonie. Il répond ainsi à la nécessité de respecter des **spécifications** précises nécessaires pour cartographier l'herbier de posidonie selon une méthode reproductible à tout le linéaire de la région PACA. La stratégie adoptée prévoit une **méthodologie** complète de traitement de l'information relative à l'herbier, depuis son acquisition jusqu'à sa restitution sous forme cartographique. Dans cette optique, le recours à l'information géographique et aux logiciels dédiés, de type SIG, est pleinement associé au processus de cartographie préconisé.

Pour expliciter et valider la démarche adoptée, le programme de travail s'est appuyé sur des opérations réalisées en conditions réelles sur **deux zones ateliers** de la côte PACA (Baie de Saint Cyr Les Lecques et Côte Bleue). Sur ces sites, le processus complet a été suivi et appliqué pour déboucher sur la réalisation d'un **atlas cartographique** de l'herbier présent dans ces zones. L'ensemble des actions et tâches inhérentes à ce processus développées sur les deux sites ateliers est décrit dans une **notice technique** qui fait office de rapport d'étude détaillé. Le **guide**, quant à lui, est le document définitif qui revêt le caractère générique et opérationnel attendu.

Le présent document développe tout particulièrement au travers de plusieurs grandes parties les aspects relatifs à :

- la description des caractéristiques générales de l'herbier,
- l'état de l'art et les besoins 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.



1 Présentation de l'herbier à *Posidonia oceanica*

Mise en forme : Pucés et numéros

Qu'est-ce que l'herbier à *Posidonia oceanica* et comment le décrire ?

Mise en forme : Pucés et numéros

1.1 Traits d'histoire de vie de *Posidonia oceanica*

La posidonie *Posidonia oceanica*, comme toutes les Magnoliophytes (= Phanérogames) marines, descend d'ancêtres terrestres, retournés en mer il y a environ 100 millions d'années (Larkum & Hartog, 1989). Les caractéristiques de base des Magnoliophytes ont été conservées : racines pouvant descendre au moins à 70 cm de profondeur (Francour & Semroud, 1992), fleurs, graines (Fig. 1 ; Boudouresque & Meinesz, 1982), appareil conducteur (Libes & Boudouresque, 1987), réseau de lacunes et de canaux (aérarium) remplis d'air dans lequel baignent les cellules (Acunto *et al.*, 2000), etc. La posidonie se présente sous la forme de rhizomes rampants (plagiotropes) ou dressés (orthotropes) terminés par des bouquets de 5-6 feuilles rubanées (faisceaux), larges d'environ 1 cm, longues de 50-120 cm et à croissance basale (Caye, 1980 ; Boudouresque & Meinesz, 1982). La densité des faisceaux peut atteindre 1000/m² près de la surface ; elle diminue progressivement en profondeur, où elle peut descendre en dessous de 100/m² en limite inférieure de l'herbier (Pergent *et al.*, 1995).

Supprimé : Les herbiers à phanérogames, place et rôle de l'herbier de Posidonie, ...
 L'herbier est constitué de feuilles et de rhizomes ...
 Répartition spatiale « normale » de par son mode de fonctionnement, ...
 Sensibilité de son état de santé (dynamisme, vitalité) aux conditions de milieu, ...



Figure 1. Inflorescence (à gauche) et fruits (à droite) de *Posidonia oceanica*. D'après Boudouresque & Meinesz (1982).

Posidonia oceanica est endémique de la Méditerranée. Elle y est présente presque partout, à l'exception du voisinage immédiat du détroit de Gibraltar, des côtes d'Israël et

du Liban (sans doute trop chaudes en été) et de la Haute Adriatique, peut-être en raison des basses températures hivernales (Boudouresque *et al.*, 1994). Cette dernière raison, ainsi que d'importants mouvements de sédiment, peut expliquer sa rareté le long des côtes du Languedoc : elle ne survit pas en dessous de 10°C et en dessus de 29°C (Augier & Robert, 1980). La posidonie craint la dessalure (< 33‰) et la sursalure (> 41‰), ce qui explique son absence dans les lagunes littorales, devant l'embouchure des fleuves côtiers, et au centre de certaines baies, au niveau des exutoires de nappes phréatiques (Ben Alaya, 1972). Dans les biotopes favorables, *P. oceanica* se développe dans tout l'étage infralittoral, du voisinage de la surface jusque vers 20-40 m de profondeur, selon la transparence de l'eau, le plus souvent sur substrat meuble (quelle qu'en soit la granulométrie), plus rarement sur roche ; elle y constitue des prairies que l'on nomme habituellement "herbiers" (Molinier & Picard, 1952).

La floraison de *P. oceanica* se produit curieusement à l'automne ; bien qu'elle ne soit pas aussi rare qu'on ait pu le penser, elle ne se produit pas tous les ans et concerne souvent des aires assez limitées (Giraud, 1977 ; Caye & Meinesz, 1984 ; Mazzella *et al.*, 1984 ; Thélin & Boudouresque, 1985 ; Pergent *et al.*, 1989 ; Stoppelli & Peirano, 1996). Les jeunes fruits avortent souvent massivement, de telle sorte que la dissémination des fruits ("olives de mer"), mûrs à la fin du printemps, est encore plus rare que la floraison (Thélin & Boudouresque, 1985 ; Meinesz *et al.*, 1988b). Bien que des jeunes plants issus d'une graine aient été observés *in situ* (Balestri *et al.*, 1998 ; Gambi & Guidetti, 1998), il semble que les boutures constituent le principal mode de dissémination de la posidonie (Molinier & Picard, 1952 ; Boudouresque & Meinesz, 1982 ; Meinesz *et al.*, 1992).

La croissance des rhizomes de *P. oceanica* est très lente (Caye, 1982). La progression annuelle d'un rhizome orthotrope est en moyenne de 2 cm/an (maximum observé : 7.7 cm). La progression des rhizomes plagiotropes est un peu plus rapide et peut dépasser 10 cm/an (Caye, 1982 ; Boudouresque *et al.*, 1983, 1984). Toutefois, sur le long terme, la progression d'un front d'herbier, grâce à la croissance des rhizomes plagiotropes, ne dépasse pas 3-4 cm/an en moyenne (Meinesz & Lefèvre, 1984 ; Meinesz *et al.*, 1991). Il en résulte que la destruction d'un herbier de posidonie est irréversible à l'échelle humaine (Meinesz *et al.*, 1991 ; Boudouresque *et al.*, 1994 ; Pergent-Martini *et al.*, 2000).

1.2 L'édification des herbiers

Les feuilles de *P. oceanica* ralentissent les mouvements de l'eau et donc diminuent l'énergie cinétique des particules sédimentaires transportées. Celles-ci sédimentent donc dans l'herbier. Il s'y ajoute les restes des organismes calcifiés qui vivent dans l'herbier (Echinodermes, Mollusques). Au total, le fond s'exhausse lentement. Grâce à ses rhizomes orthotropes, à croissance verticale, la posidonie réagit à cette sédimentation, à condition qu'elle ne dépasse pas 7 cm/an (Molinier & Picard, 1952 ; Boudouresque &

Mise en forme : Pucés et numéros

Supprimé : En fonction des conditions de milieu qui l'environne, l'herbier présente des caractéristiques très variables. Ces caractéristiques peuvent être appréciées sur un double plan, (i) biologique et (ii) dynamique. ¶

L'herbier de posidonie, se développe dans son environnement en fonction de facteurs favorables que sont notamment la lumière, la transparence de l'eau, etc. Compte tenu de l'accès à la lumière, l'herbier se développe dans une tranche bathymétrique précise, que l'on situe entre une **limite supérieure** et une **limite inférieure**. Cette **frontière spatiale** ... ¶

Par ailleurs, l'herbier se caractérise au sol par un degré de couverture qui peut être variable également selon les cas. On parle alors, de **taux de recouvrement**. Ce

pourcentage ... ¶
Enfin, en rapport direct avec les conditions de milieu, l'herbier peut présenter des types d'implantation différents indicateurs de sa vitalité, comme par exemple en touffes compactes ou, au contraire, en faisceaux isolés. On parle alors de **densité** de l'herbier. Ce **nombre** ... ¶

¶ Les conditions de milieu, notamment celles qui sont liées à sa qualité, conditionnent directement l'état de santé de l'herbier. Aussi, une autre catégorie de paramètres caractérisent de ce point de vue l'herbier, en terme de **dynamique** de l'herbier. Cette **notion** ... ¶

¶ Des facteurs peuvent venir perturber ce développement naturel et optimal et le plonger dans un état de déséquilibre pouvant nuire fortement à son état de santé général. Les conséquences peuvent se ressentir sous plusieurs formes, comme la régression spatiale (en limite supérieure comme en limite inférieure et par diminution de son recouvrement) et biologique, par diminution de la densité de ses faisceaux pouvant conduire, à l'extrême, à sa disparition totale. A l'inverse, un milieu perturbé peut, par suite d'efforts de restauration, recouvrir des propriétés et une qualité qui autorise une régénération et un retour vers un état plus satisfaisant de l'herbier. ¶

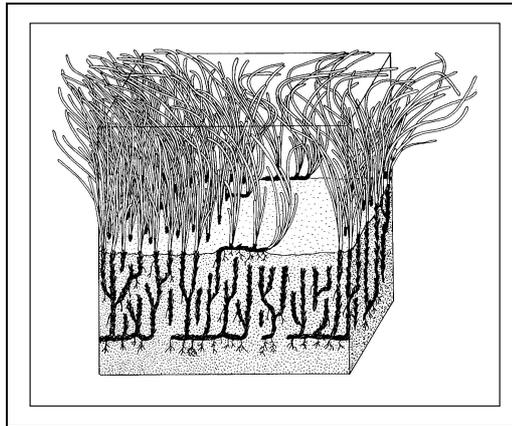
D'autres caractéristiques peuvent être prises en compte, comme la présence de mottes mortes, **indicatrice d'une évolution régressive de l'herbier** ... ¶

¶ Toutes ces formes d'évolution relèvent, en fait, de la dynamique même de l'herbier. L'appréciation de cette notion est d'importance car elle procure d

[1]

Jeudy de Grissac, 1983). Dans l'épaisseur du sédiment, les rhizomes et les racines sont très peu putrescibles et se conservent pendant des millénaires (Boudouresque *et al.*, 1980 ; Boudouresque & Jeudy de Grissac, 1983 ; Romero *et al.*, 1994). On désigne sous le nom de "matte" l'ensemble constitué par un lacis serré de rhizomes et de racines et par le sédiment qui colmate les interstices (Fig. 2 ; Molinier & Picard, 1952).

Figure 2. Bloc diagramme d'une matte de *Posidonia oceanica* montrant les rhizomes rampants (à la base : phase de colonisation par la posidonie) devenus verticaux (lutte pour l'espace ou résistance à l'ensablement) mais pouvant redevenir horizontaux (recolonisation d'une intermatte, zone où la posidonie est morte). Cet ensemble très compact, constitué par un lacis dense de rhizomes et par le sédiment qui colmate les interstices, est nommé "matte". D'après Boudouresque & Meinesz (1982).



Les mattes s'élèvent lentement, à la vitesse de 1 m par siècle, en fonction du taux de sédimentation et des cycles érosion-construction ; dans la rade d'Hyères, une épaisseur minimale de 10 m a été observée. Il en résulte que, dans les baies, elles peuvent atteindre la surface ou s'en approcher (Molinier & Picard, 1952 ; Boudouresque & Meinesz, 1982).

Supprimé : Illustrations photo de types d'herbier caractéristiques

Mise en forme : Pucet et numéros

1.3 Les différents types d'herbier

En fonction de la profondeur, de l'hydrodynamisme, de la température moyenne de l'eau, de l'intensité de la sédimentation et des équilibres qui en résultent entre édification de la matte et érosion, l'herbier à *P. oceanica* se présente sous divers aspects, que l'on peut assimiler à des paysages (Boudouresque *et al.*, 1985a, 1990).

- (1) On désigne sous le nom de "herbier de plaine" le type d'herbier à *P. oceanica* le plus commun (au moins en Méditerranée occidentale). Il se présente sous la forme d'une prairie plus ou moins continue, horizontale ou en pente douce, généralement entrecoupée par des structures érosives (tombants de matte, chenaux perpendiculaires à la côte et chenaux parallèles à la côte) ou par des taches dépourvues de *P. oceanica* (intermattes de sable ou de matte morte) (Fig. 3 ; Blanc & Jeudy de Grissac, 1978, 1984 ; Boudouresque *et al.*, 1985a ; Chessa & Fresi, 1994).

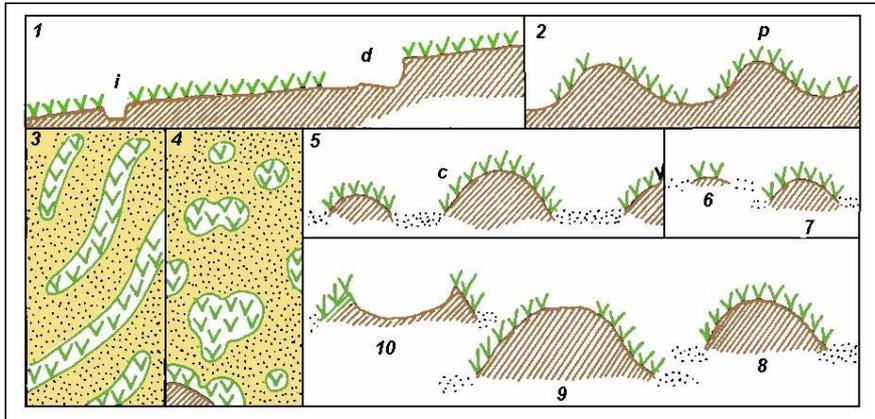
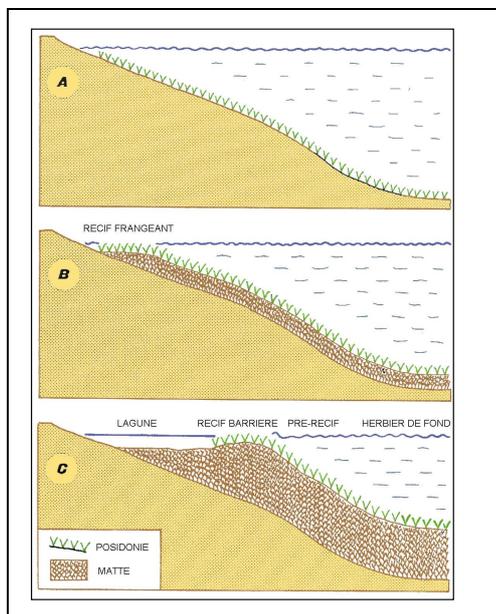


Figure 3. Les différents types d'herbier à *Posidonia oceanica*. 1 : Herbier de plaine, vu en coupe ; i = intermatte ; d = intermatte déferlante. 2 = herbier en pain de sucre, vu en coupe. 3 : Herbier tigré, vu en plan. 4 : Herbier de colline, vu en plan. 5 : Herbier de colline, vu en coupe ; c = colline. 6 à 10 : évolution d'une colline, de sa formation à son démantèlement. vuv = *Posidonia oceanica*, pointillés = sable, hachures obliques = mat. D'après Boudouresque *et al.* (1985a).

- (2) Dans les baies abritées, la montée de la mat peut conduire l'herbier à atteindre la surface de l'eau ; les feuilles s'y étalent ; ainsi se constitue un "récif-frangeant" de Posidonies qui, par progression vers le large, devient un "récif-barrière", séparé de la côte par un "lagon" (= lagune) peu profond (Fig. 4). Des récifs-frangeants sont présents à Noli, Framura et Porto-Venere (Ligurie italienne) (Bianchi & Peirano, 1995). Le récif-barrière le plus connu est celui de la baie de Port-Cros (Var, France), où Molinier & Picard (1952) ont décrit pour la première fois le mécanisme édificateur ; d'autres récifs-barrières, généralement moins spectaculaires, à l'exception de celui du Brus (Var), sont présents à Prelo (Ligurie italienne), Sainte-Marguerite (Alpes-Maritimes, France), San Fiurenzu (Corse), Puerto de Sanitja, baie d'Addaia (Menorca, Baléares) et dans l'anse de Kouali (Tipasa, Algérie) (Molinier & Picard, 1952, 1953 ; Augier & Boudouresque, 1970 ; Vidal *et al.*, 1994 ; Bianchi & Peirano, 1995 ; Boumaza, 1995 ; Ribera *et al.*, 1997).

Figure 4. La formation d'un récif-frangeant (B), puis d'un récif-barrière de posidonie (C), dans une baie de mode calme, par élévation de la matte. D'après Boudouresque & Meinesz (1982).



- (3) Entre 10 et 20 m de profondeur (parfois moins), lorsque l'hydrodynamisme est relativement important, l'herbier peut se présenter sous la forme d'un "herbier de colline" (Fig. 3 : 5 à 10). *Posidonia oceanica* constitue des collines sub-circulaires ou ovoïdes, souvent confluentes, entourées par un fond sableux. L'herbier de colline semble correspondre à un équilibre dynamique entre les collines et le sable : les jeunes collines (Fig. 3 : 6) ont un faible diamètre et s'élèvent peu au dessus du fond sableux environnant ; progressivement, les collines croissent en diamètre et en hauteur (Fig. 3 : 7 et 8) ; lorsque les collines atteignent une hauteur d'environ 1 m, le bilan sédimentaire (négatif, nul ou trop faiblement positif) devient inférieur à la croissance des rhizomes : ceux-ci se déchaussent, et deviennent vulnérables à l'hydrodynamisme (Fig. 3 : 9) ; le démantèlement des collines commence par leur sommet (Fig. 3 : 10), pour aboutir à la destruction complète de la colline (Boudouresque *et al.*, 1985a). Des herbiers de colline ont été observés en Corse, dans le Var, en Ligurie (Italie) et en Egypte (Boudouresque *et al.*, 1985a ; Stoppelli & Peirano, 1996).

- (4) Autour des îles Kerkennah (Nord du Golfe de Gabès, Tunisie), l'herbier à *Posidonia oceanica* se présente sous un aspect très particulier et extrêmement original, connu sous le nom de "herbier tigré" (Fig. 3 : 3) : des bandes d'herbier de plusieurs dizaines de mètres de longueur, larges d'un à deux mètres, serpentent dans une pelouse à

Cymodocea nodosa et à *Caulerpa prolifera*, entre 0.5 et 3 m de profondeur. Ces bandes se déplacent parallèlement à elles-mêmes, à la vitesse de 10 cm/an, contre le courant dominant. L'herbier tigré constitue un type de paysage pratiquement spécifique aux îles Kerkennah, bien qu'il ait été observé, de façon très locale et limitée, dans trois autres secteurs de Méditerranée, la Corse, la Sicile (près de Marsala) et la Turquie (Blanpied *et al.*, 1979 ; Calvo & Fradà-Orestano, 1984 ; Boudouresque *et al.*, 1990a).

- (5) L'herbier "en pain de sucre" a été décrit par Molinier & Picard (1952) à faible profondeur, dans des secteurs où la température de l'eau peut être importante en été (Fig. 5). Sa formation s'explique par le fait que l'herbier ne survit que dans des taches qui continuent à s'élever, alors que cette élévation est bien sûr interrompue dans les zones qui entourent ces taches, et où l'herbier est mort. Ce type d'herbier est par exemple présent dans la baie de Porto Conte, en Sardaigne (Chessa & Fresi, 1994), ainsi qu'en Tunisie (Molinier & Picard, 1952).

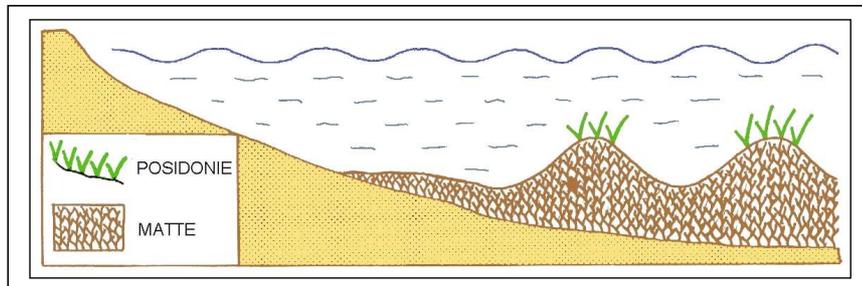


Figure 5. Un herbier de posidonie en pain de sucre. D'après Boudouresque (inédit).

Mise en forme : Puces et numéros

1.4 Flore et faune associée

La flore et la faune de l'herbier à *P. oceanica* sont d'une exceptionnelle richesse. Environ 20% de toutes les espèces recensées en Méditerranée y ont été signalées, ce qui en fait le principal pôle de biodiversité en Méditerranée (Boudouresque, 1996).

Le caractère le plus original de l'herbier à *P. oceanica* (qu'il partage avec les autres herbiers à Magnoliophytes marines) est la juxtaposition de deux types de production primaire (Boudouresque *et al.*, 1994 ; Boudouresque, 1996). Le premier est la production de la posidonie elle-même ; il s'agit d'une matière végétale riche en composés peu biodégradables (cellulose, lignine), protégée chimiquement (acides phénoliques) contre les herbivores (Piovetti *et al.*, 1984 ; Cuny *et al.*, 1995 ; Agostini *et al.*, 1998). Le second type de production est celui des épiphytes des feuilles, facilement biodégradables, sans défenses chimiques, et donc très appréciés par les herbivores.

La posidonie est peu consommée par les herbivores : moins de 10% (Velimirov, 1984 ; Boudouresque *et al.*, 1994 ; Rico-Raimondino, 1995 ; Pergent *et al.*, 1997) : l'oursin *Paracentrotus lividus*, le poisson *Sarpa salpa* et divers crabes du genre *Pisa* principalement. Une partie des feuilles mortes reste sur place, constituant une litière consommée par de nombreux détritivores, principalement des Crustacés, et des Echinodermes ; la dégradation est lente : plusieurs mois à plus d'une année (Zupi & Fresi, 1984 ; Romero *et al.*, 1992 ; Mazzella *et al.*, 1995 ; Rico-Raimondino, 1995 ; Pergent *et al.*, 1997) ; le reste (en moyenne (40%) est exporté vers d'autres écosystèmes, où ces feuilles constituent un apport majeur de nourriture (Verlaque & Nédélec, 1983 ; Pergent *et al.*, 1994).

Les épiphytes des feuilles sont principalement des Rhodobiontes, calcifiées ou non (*Acrochaetium* spp., *Pneophyllum fragile*, etc.), des Fucophycées (*Cladosiphon cylindricus*, *Giraudia sphacelarioides*, *Myriactula gracilis*, *Myrionema orbiculare*, etc.), des Bryozoaires (*Electra posidoniae*, *Collarina balzaci*, etc.) et des Hydraires (*Aglaophenia pluma*, *Monothecha posidoniae*, etc.) (Pérès & Picard, 1964 ; Ben, 1969 ; Panayotidis, 1980 ; Panayotidis & Boudouresque, 1981 ; Romero, 1988). Ils sont consommés par l'oursin *Paracentrotus lividus* et par le poisson *Sarpa salpa* (en même temps que les feuilles) ainsi que par de nombreux petits Gastropodes (*Gibbula ardens*, *Alvania lineata*, *Rissoa violacea*, *R. italiensis*, *Bittium latreillii*, etc.) et Crustacés Amphipodes (*Amphithoe ramondi*, *Hyale camptonyx*, *H. schmidtii*, etc.) (Ledoyer, 1962 ; Gambi *et al.*, 1992 ; Mazzella *et al.*, 1992 ; Zupi, 1993 ; Lepoint *et al.*, 2000).

De nombreuses espèces de prédateurs, principalement des poissons (*Coris julis*, *Diplodus annularis*, *Labrus viridis*, *Scorpaena porcus*, *S. scrofa*, *Serranus scriba*, *Symphodus cinereus*, *S. ocellatus*, *S. rostratus*, *S. tinca*, etc.) et des étoiles de mer (*Luidia ciliaris*, *Marthasterias glacialis*) se nourrissent des Crustacés, Gastropodes, Polychètes, oursins et pour quelques uns des poissons de l'herbier à *P. oceanica* (Harmelin-Vivien, 1982, 1984 ; Khoury, 1984 ; Zupi & Fresi, 1984 ; Dance & Savy, 1987 ; Savy, 1987).

Au total, l'écosystème à *P. oceanica* (Fig. 6) comporte deux entrées de carbone organique (Boudouresque *et al.*, 1994) : la consommation du plancton des eaux qui traversent l'herbier, par les filtreurs et suspensivores de l'herbier, et les poissons planctonophages de la colonne d'eau (*Chromis chromis*, *Spicara maena*), victimes de prédateurs nocturnes pendant qu'ils dorment dans l'herbier (Harmelin-Vivien, 1982). Il y a trois sorties : l'exportation de feuilles mortes hors de l'herbier, les poissons adultes qui quittent l'herbier (qui ne constitue pour certaines espèces qu'une nurserie) et le carbone démobilisé dans l'épaisseur de la matre, qui constitue un puits (Pergent *et al.*, 1994 ; Romero *et al.*, 1994 ; Jimenez *et al.*, 1996).

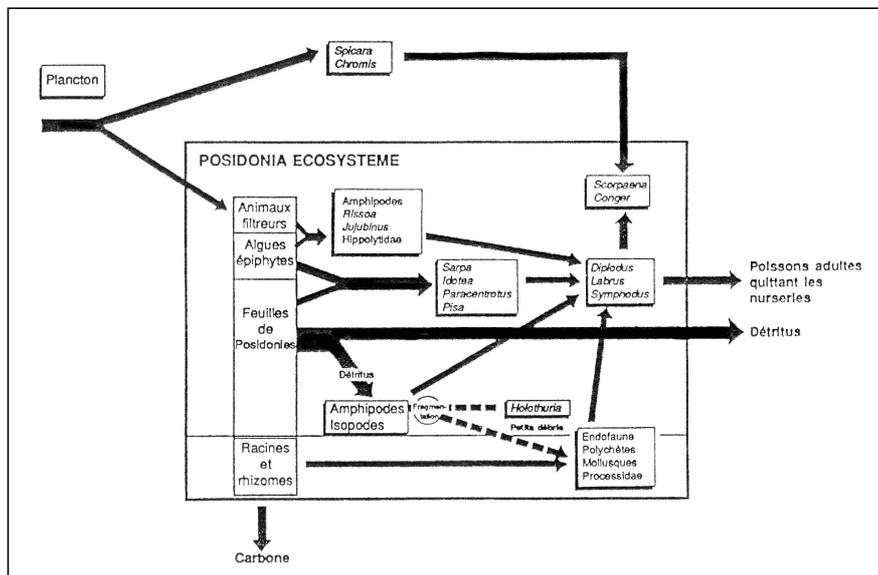


Figure 6. Modèle simplifié de fonctionnement de l'écoystème à *Posidonia oceanica*. *Jubinus* et *Rissoa* sont des Gastropodes, *Holothuria* et *Paracentrotus* des Echinodermes, les Hippolytidae, les Processidae, *Idotea* et *Pisa* des Crustacés, *Chromis*, *Conger*, *Labrus*, *Sarpa*, *Scorpaena*, *Spicara* et *Symphodus* des poissons. D'après Boudouresque et al. (1994).

2 Etat de l'art et besoins en cartographie

**Qu'en est-il de la cartographie de l'herbier de l'herbier jusqu'à aujourd'hui
et
à quels besoins répondent les cartographies des biocénoses marines en général et
de l'herbier, en particulier ?**

2.1 Etat de l'art

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).

Toutefois, les cartes sur lesquelles apparaissent les herbiers sont beaucoup plus anciennes. Les premières sont celles de Marion (1883) et de Pruvot (1894, 1897). Il s'agit toutefois de cartes à très petite échelle, et la méthode utilisée, peu explicitée, est sans doute largement empirique.

D'une façon générale, les méthodes cartographiques utilisées **ne sont pas spécifiques** des herbiers à *P. oceanica*. Même lorsque l'herbier est clairement la cible de la cartographie, d'autres types de fonds sont représentés : fonds de sable (SGCF², SFBC³, etc.), fonds détritiques (par exemple le Détritique côtier, DC), fonds de vase (par exemple les VTC⁴ et les SVMC⁵), fonds rocheux infralittoraux, etc. (voir Pérès & Picard, 1964, pour la définition de ces assemblages). Ces méthodes ont évolué dans le temps, en fonction des outils disponibles. Elles diffèrent également en fonction de **l'échelle** et des **objectifs**.

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, 1955, 1956 ; Blanc 1958 ; Astier, 1972). Elles sont très imprécises. Il est

² SGCF : Sables et Gravieres sous l'influence des Courants de Fond.

³ SFBC : Sables Fins Bien Calibrés.

⁴ VTC : Vases Terrigènes Côtieres.

⁵ SVMC : Sables vaseux en Mode Calme.

important toutefois de souligner que ce sont ces cartes qui ont permis de jeter les bases du corpus des connaissances actuelles sur le rôle et la dynamique des herbiers.

A la même époque, les cartes à petite et moyenne échelle des herbiers plus profonds étaient réalisées à partir de **dragages** ou de **bennes** (Picard, 1965 ; Bourcier, 1980, 1982 ; Molinier, 1960). Cette méthode, dont la précision dépend de la longueur des traits de drague et du maillage des dragages et des bennes, est interdite aujourd'hui, puisqu'elle est destructive, partout où *P. oceanica* est protégée.

Par la suite, les cartes à grand échelle ont été réalisées à partir de **photographies aériennes**, l'apnée ou la plongée correspondant à une vérité-terrain. Toutefois, les photographies utilisées n'étaient généralement pas corrigées (clichés parfois obliques, erreurs de paralaxe, etc.) et, en l'absence de GPS, le positionnement des plongeurs était approximatif. On peut citer les cartes de Blanc & Jeudy de Grissac (1978), Augier & Boudouresque (1967, 1970a, 1970b, 1976), Blanpied *et al.* (1979), Niéri (1983), Augier *et al.* (1984), Ramos-Espla (1984) et Calvo & Fradà-Orestano (1984). Dans beaucoup de secteurs de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, ces cartes représentent encore aujourd'hui la seule source d'information sur la localisation des herbiers à *P. oceanica*. Pour les herbiers superficiels (10-20 m selon la transparence de l'eau), l'utilisation de photographies aériennes, couplée aux outils modernes de correction d'image, de traitement d'image et de positionnement des vérités-terrain, représente le meilleur compromis coût-précision (Meinesz *et al.*, 1981 ; Pasqualini, 1997 ; Pasqualini *et al.*, 1988b ; Boudouresque *et al.*, 2000 ; Charbonnel *et al.*, 2000, 2001 ; 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 ; Charbonnel *et al.*, 2000). Par ailleurs, cette méthode s'adapte à toutes les échelles, depuis des cartes à très grande échelle jusqu'à des cartes à petite échelle. C'est la raison pour laquelle elle a été retenue dans le présent Guide méthodologique.

Le **quadrillage par des filins** avec relevé en plongée est adapté à la cartographie à très grande échelle et haute précision de secteurs réduits (Meinesz & Lefèvre, 1984 ; Boudouresque *et al.*, 1985b ; Pergent & Pergent, 1985 ; Pergent *et al.*, 1985, 1991). Il convient de citer également les **transects** sous-marins parcourus en plongée, éventuellement en scooter sous-marin (Meinesz *et al.*, 1981 ; Meinesz & Simonian, 1983 ; Niéri, 1983 ; Augier *et al.*, 1984 ; Ramos-Espla, 1984 ; Meinesz *et al.*, 1986a, 1988a ; Charbonnel *et al.*, 1996) et l'utilisation d'un **ROV**, caméra tractée par un navire (Belsher & Houlgatte, 2000 ; Piazzini *et al.*, 2000 ; Denis *et al.*, 2001). Les transects sous-marins ont généralement été utilisés en couplage avec d'autres méthodes. C'est le cas dans le présent guide méthodologique, où nous retenons les transects sous-marins, dans le cadre des vérités-terrain, à la fois pour les herbiers superficiels et profonds.

Le suivi de la limite inférieure en **sous-marin** (Meinesz & Laurent, 1978 ; Meinesz *et al.*, 1981 ; Meinesz & Laurent, 1982 ; Meinesz *et al.*, 1986b) ou en plongée (Meinesz *et*

al., 1987, 1988b, 1989 ; Meinesz & Verlaque, 1989 ; Meinesz *et al.*, 1998), avec repérage en surface du parcours suivi (GPS ou amers), a permis de fournir des données d'une grande précision, mais est très coûteux (sous-marin) ou très consommateur en temps (plongée).

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.*, 1998a, 1998b, 2000 ; Denis *et al.*, 2001 ; Diviacco *et al.*, 2001). 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 afin de lever les incertitudes, ce qui est habituellement le cas. C'est la raison pour laquelle cette méthode a été retenue dans le présent Guide méthodologique (en association avec la photographie aérienne ; voir plus haut).

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 (Rey & Diaz del Rio, 1989), l'imagerie **multispectrale** aéroportée (Jaubert *et al.*, 2001) et le **kriging** (Francour & Marchadour, 1989 ; Scardi *et al.*, 1989). Quant à l'imagerie **satellitaire**, n'a pour le moment donné que des résultats assez décevants, en raison de sa faible pénétration dans l'eau (Belsher *et al.*, 1985, 1988 ; Hoareau, 1988 ; Meinesz *et al.*, 1991 ; Paillard *et al.*, 1993) (voir encart).

Il faut noter que la cartographie des biocénoses marines évolue en permanence. Elle vise notamment à compléter les méthodes d'investigation du milieu en recourant par exemple à la vidéo sous marine (Denis *et al.*, 2001, Bernard *et al.*, 2002) et aussi à améliorer les techniques de traitement de l'image numérique sonar⁶ ou vidéo (Bernard *et al.*, 2002). L'élargissement du champ des modes de reconnaissances sous marines permet ainsi d'optimiser la stratégie de cartographie à adopter pour répondre au mieux aux différents besoins.

Au total, la cartographie des herbiers à *P. 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. Le long de la plus grande partie des 46 000 km de côtes de la Méditerranée, il n'existe aucune carte. Dans un certain nombre de régions (par exemple le Var, les Bouches-du-Rhône, la Comunitat 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. Enfin, des cartes répondant aux critères actuels de précision minimale existent le long d'environ 3 000 km de côtes : la Corse, la Ligurie, la Toscane et le Latium.

⁶ Logiciel CARAIBES, http://www.ifremer.fr/flotte/equipements_sc/logiciels_embarques/index.html

Toutefois, la plupart de ces cartes sont **quantitatives** : elles indiquent la présence ou l'absence d'herbier, éventuellement les herbiers dégradés et les mattes mortes. L'ambition du présent Guide méthodologique est de passer du stade quantitatif au stade **qualitatif** : quel est l'état des herbiers ? Quelle est leur cinétique de progression ou de déclin ? Les gestionnaires des espaces littoraux ont en effet besoin, aujourd'hui, d'un tel outil.

L'imagerie satellitaire et aéroportée

Lorsque la zone d'étude est de grande taille, les images fournies par les satellites d'observation de la terre peuvent être utilisées. Cependant, ils ne constituent pas encore une alternative suffisante pour couvrir l'ensemble des besoins en images nécessaires à la constitution de cartes de la frange côtière. En effet, la résolution des images transmises par les différents satellites couvrant ce domaine peut dans le meilleur des cas être de 20 m en couleur et 10 m en noir et blanc (par exemple pour SPOT), ce qui permet une restitution cartographique des thèmes observés dans une fourchette d'échelles comprises entre le 1/50 et le 1/100 000^e. Ce type d'outil est donc plus particulièrement adapté aux approches globales des territoires.

Parmi les nombreux satellites opérationnels existants, quelques uns s'avèrent plus particulièrement adaptés aux études à caractère environnemental. Pour ce qui concerne les investigations en frange côtière, le satellite SPOT est assez largement utilisé puisqu'il permet, grâce à une large panoplie de signatures spectrales validées, de distinguer différents types de fonds et couvertures végétales, jusqu'à une profondeur de 10 à 12 m en moyenne. La nouvelle génération de satellite SPOT (SPOT 5) offrira davantage de discrimination des grands groupes de substrats et de végétaux avec ses 4 canaux (2 visibles, le PIR et le MIR).

Dans le domaine de l'aéroporté, il faut noter l'existence de l'imagerie CASI, en cours de mise au point, dont les performances sont accrues avec ses 10 à 13 canaux (VIR, PIR) et sa résolution de 2 à 5 mètres.

Toutefois, les évolutions technologiques dans le domaine de l'observation spatiale se poursuivent toujours, notamment avec le LIDAR, ou encore les satellites militaires d'observation Hélios récemment mis en orbite, qui permettent d'envisager des approches plus locales et plus fines.

Site de SPOT IMAGE : <http://www.spotimage.fr>

2.2 Les besoins

2.2.1 Résultats d'analyse

Une analyse historique des besoins en cartographie a été effectuée par enquête à partir d'un échantillon représentatif des cartographies réalisées en région PACA et Corse ces 15 dernières années. Celles-ci se caractérisent en terme de thématiques couvertes,



d'échelles de travail et de restitution et, encore, de formats et de précision ; autant de paramètres dépendants initialement des caractéristiques des sources de données et, par conséquent des types de moyens mis en œuvre.

Les **demandeurs** ou commanditaires principaux peuvent être classés en 6 catégories qui regroupent :

- les collectivités locales essentiellement représentées par les communes ;
- les collectivités territoriales, représentées par les Conseils Régionaux et Généraux, auxquels se rajoutent les communautés de communes et autres regroupements tels que les syndicats intercommunaux ;
- les organismes d'Etat, services et représentants, parmi lesquels figurent les DIREN, l'Agence de l'Eau, l'Ifremer, les DDE et CQEL, etc. ;
- les gestionnaires de parcs, de réserves, etc. ;
- les entreprises comme France TELECOM, EDF, la Lyonnaise des Eaux, le PAM, etc. ainsi que des bureaux d'études ;
- les ONG qui représentent le public ou les usagers du milieu. A noter que cette catégorie a été établie pour mémoire car, si l'on ressent ses besoins potentiels, l'échantillonnage retenu n'a pas mis en évidence de réalisations concrètes.

Il ressort de cette analyse que les demandeurs sont très diversifiés. La majorité d'entre eux n'a commandité qu'une seule cartographie, ce qui renforce le besoin d'aide méthodologique.

La catégorie la plus importante en nombre d'acteurs est celle des collectivités locales suivie de près par les organismes d'Etat. Par contre, d'un point de vue quantitatif, la demande des collectivités territoriales se voit renforcée.

Les **objectifs** de cartographie répondant aux besoins des commanditaires ont été répertoriés en deux grands types, à savoir :

- les études du milieu pour améliorer la connaissance en réponse à des besoins de compréhension des structures et du fonctionnement du système côtier, le suivi en réponse à des besoins d'aide à la gestion de l'espace côtier et encore, les inventaires patrimoniaux, en réponse aux besoins de la gestion et de protection des espèces et des habitats naturels remarquables ;
- les études d'impact, commanditées pour évaluer les effets sur le milieu des actions anthropiques, notamment, de type aménagement.

Les cartographies réalisées pour les études d'impact sont nombreuses et représentent 50 % du total. Cependant, elles peuvent être accompagnées de cartographies plus globales qui s'avèrent utiles pour fournir les connaissances générales nécessaires à l'évaluation et au suivi des secteurs couverts. Les inventaires patrimoniaux répondent, quant à eux, à des besoins spécifiques mais recherchent et s'appuient, eux aussi, sur des approches

plus globales qui leur servent de cadre et de lien avec l'environnement général des sites inventoriés.

Les **thématiques** cartographiées, en réponse à ces besoins, couvrent pour une large majorité une base d'informations communes, portant essentiellement sur l'aire de répartition de l'herbier de posidonie et la nature des éléments qui l'environnent, tels les autres biocénoses remarquables (autres types de phanérogames, les peuplements du coralligène ou encore les espèces introduites) et le substrat. Des informations particulières peuvent cependant être demandées pour répondre à des besoins spécifiques, avec plus de précision, dans le cas, par exemple, des inventaires patrimoniaux et, à l'inverse, dans le cas des suivis ou recherche plus de concision, une information très spécifique (information synthétique portant, par exemple, sur des notions de sensibilité, de dynamique ou de vitalité, ...).

Les **échelles** de travail (surface d'emprise des études et de cartographie) et de représentation (échelles des cartes) s'inscrivent dans des gammes ajustées aux besoins des commanditaires.

Les échelles de travail se situent généralement à deux niveaux, l'un global dès lors qu'il s'agit d'étudier et de cartographier un site correspondant à une unité géomorphologique (baie ou golfe, cap ou pointe) de dimension kilométrique et l'autre, local, dès lors que l'emprise est de taille hecto. à décamétrique.

Parmi les échelles de représentation, il faut distinguer l'échelle effective des levés (à laquelle correspond le niveau de précision de l'information acquise) de celle de représentation (en relation directe avec le format d'édition). Cinq gammes d'échelles (fourchettes) de représentation sont identifiées, à savoir :

- les très grandes échelles : supérieures au $1/1\ 000^{\text{e}}$ (dont le $1/150^{\text{e}}$, $1/500^{\text{e}}$, ...),
- les grandes échelles : entre le $1/1\ 000^{\text{e}}$ et le $1/10\ 000^{\text{e}}$ (dont le $1/1\ 000^{\text{e}}$, $1/2\ 000^{\text{e}}$, $1/4\ 000^{\text{e}}$, $1/5\ 000^{\text{e}}$, $1/8\ 000^{\text{e}}$, etc.),
- les échelles moyennes : entre le $1/10\ 000^{\text{e}}$ et le $1/20\ 000^{\text{e}}$ (dont le $1/15\ 000^{\text{e}}$),
- les petites échelles : entre le $1/20\ 000^{\text{e}}$ et le $1/50\ 000^{\text{e}}$ (dont le $1/25\ 000^{\text{e}}$ et le $1/30\ 000^{\text{e}}$),
- les très petites échelles : inférieures au $1/50\ 000^{\text{e}}$ (dont le $1/200\ 000^{\text{e}}$).

Ce sont les grandes échelles qui sont les plus usitées. Cela s'explique tout d'abord du fait de la forte proportion de cartographies réalisées pour répondre aux besoins des études d'impact, considérées en tant que telles. Tous objectifs confondus, c'est également cette gamme d'échelle qui est la plus utilisée.

Le recours au changement d'échelle est fréquent pour agrandir une zone cartographiée afin de la rendre plus lisible (effet de zoom) ou bien pour augmenter le degré de précision de l'information en ajustant les niveaux de la nomenclature.

Quant aux **formats**, dont la gamme est normalisée (du A4 au A0), ils permettent de représenter l'information géographique dans les meilleures conditions de lisibilité (« pixel papier » minimal renseigné de l'ordre de 16 mm²) et d'accessibilité (taille pour une manipulation confortable). Sur cette base, une correspondance d'échelle existe entre le « pixel terrain » et le « pixel papier » pour permettre d'optimiser la représentation cartographique des informations.

Tous les formats sont utilisés, les formats A4 et A3 sont cependant majoritairement demandés, pour des raisons pratiques de consultation des cartes.

En conclusion de cette analyse, on peut résumer les besoins comme suit (Tab. I) :

Tableau I. récapitulatif des besoins en cartographie des commanditaires

Commanditaires	Objectifs		Echelles de travail	Echelles de représentation
	Premier	Second		
Collectivités locales	Etudes d'impact	Inventaire patrimonial	Locales	Grandes
Collectivités territoriales	Suivi	Connaissance	Globales	Grandes à petites
Organismes d'Etat	Connaissance	Suivi et impact	Globales	Grandes à petites
Gestionnaires de sites protégés	Inventaire patrimonial	Suivi	Globales à locales	Grandes à moyennes
Entreprises	Etudes d'impact	-	Locales	Grandes à très grandes

2.2.2 positionnement des cartographies du guide

Les cartographies des sites de Saint-Cyr sur Mer et de la Côte Bleue, proposées dans le guide méthodologique, se caractérisent de la manière suivante :

Elles répondent en priorité à un objectif de connaissance et de suivi à des fins d'aide à la gestion de l'espace côtier. En effet, les thématiques abordées couvrent le tronc commun d'informations de base, descriptives de l'herbier et de son environnement biotique et abiotique, agrémentées d'informations synthétiques renseignant sur sa vitalité, en tant qu'indicateur de l'état de santé global du milieu considéré. L'échelle de travail est plutôt considérée comme étant globale au vu de l'espace couvert, soit une partie de la baie de La Ciotat et la quasi totalité de la façade de la Côte Bleue. L'échelle de représentation se situe dans la catégorie des échelles moyennes (1/15 000^e) à petites (1/25 000^e) et les formats d'édition adoptés sont le A4 et le A3. Ces deux niveaux d'échelles et formats ont été retenus pour tenir compte de la taille et la forme des zones étudiées.



Si on considère l'analyse historique, ces cartographies répondent à un besoin généralement exprimé de la part d'organismes d'Etat, pour qui les préoccupations de gestion de l'espace littoral sont très fortes. Les produits fournis satisfont à la fois un objectif de connaissance du milieu ainsi qu'un objectif de suivi du milieu, en procurant les moyens de surveiller son évolution avec des indicateurs surfaciques et non plus seulement ponctuels. De tels produits peuvent, par ailleurs, être valorisés en fournissant une base de référence cartographique utile à d'autres démarches liées à des projets d'aménagement (objectif « études d'impact ») et de protection (objectif « inventaire patrimonial).

Pour satisfaire ces objectifs, la cartographie a fait appel à des moyens appropriés, à savoir, le sonar latéral, la photographie aérienne et la plongée. Au vu des objectifs de la cartographie, c'est cette configuration optimale qui a été appliquée.

2.2.3 Perspectives à venir

La cartographie des biocénoses va évoluer en fonction des tendances de fond touchant notre société, à savoir :

- une attention plus grande portée à la qualité de notre environnement dans la perspective d'un développement durable ;
- une décentralisation des compétences dans le domaine de l'environnement qui vise à transférer des missions de l'Etat vers les Collectivités territoriales ;
- la diffusion de techniques avancées par rapport à des techniques plus traditionnelles (ici le sonar latéral, la vidéo remorquée) ;
- une exigence beaucoup plus grande en matière d'assurance qualité des résultats et notamment de reproductibilité. Celle-ci ne peut être assurée que par des investigations quasi exhaustives.

Parmi les tendances d'évolution à court terme, il apparaît déjà que la mise en œuvre des mesures de gestion sur les sites côtiers marins bénéficiant de statuts particuliers, au titre par exemple de NATURA 2000, va se développer. Les besoins en cartographie vont ainsi s'en trouver accrus. Ces mesures de gestion vont faire de plus en plus appel à la réalisation d'états des lieux ou états de référence, d'emprise spatiale extensive tendant même à s'intégrer, à terme, aux niveaux d'échelles régionale, voire nationale.

De nos jours, la cartographie des biocénoses marines bénéficie de techniques qui permettent une restitution précise (avec un positionnement géographique fin) de la localisation des biocénoses et de leur état de vitalité. Il est donc probable que la proportion d'inventaires cartographiques patrimoniaux s'accroisse par rapport aux cartographies dites « plus classiques » réalisées, par exemple, dans le cadre d'études d'impacts. Les plupart des cartographies futures couvriront donc vraisemblablement les biocénoses d'intérêt patrimonial, à moyenne échelle et aborderont plus fréquemment les paramètres de vitalité, de dynamique et de sensibilité des biocénoses marines ; autant de

paramètres de nature et de facture synthétique plus spécifiquement recherchés pour répondre aux objectifs de gestion de la zone côtière.

En rapport avec l'accroissement des besoins actuels et potentiels, le domaine de la cartographie fait l'objet de développements technologiques, eux aussi, en constante évolution. Ils portent autant sur les moyens d'acquisition des données pour renforcer ou compléter l'approche thématique, comme par exemple la télédétection spatiale et la vidéo sous marine, que sur les équipements nécessaires à leur exploitation comme, par exemple, les plateformes d'imagerie pour le traitement des données et leur visualisation. Il faut noter, au compte des progrès enregistrés dans ce domaine, un souci permanent d'assurance qualité sur les produits cartographiques réalisés. Tous les efforts consacrés à cette tâche ont pour but d'optimiser les interventions à la mer et de produire des informations thématiques sur les biocénoses marines de haute fiabilité.

3 Stratégie adoptée pour la cartographie de l'herbier de Posidonie

Quelle stratégie adopter pour conduire à la cartographie des herbiers ?

La cartographie de l'herbier fait appel à de nombreuses données, d'origine et de nature différentes dont l'ensemble est destiné à être traité pour être cartographié. Le traitement de cet ensemble de données nécessite de suivre une **méthode** rigoureuse depuis leur collecte jusqu'à leur restitution sous forme cartographique.

Les données requises font appel, outre à la bibliographie pour bénéficier de la connaissance existante en la matière, à de nouvelles données à acquérir au moyen du sonar à balayage latéral et de la photographie aérienne et à valider par plongée, au titre des vérités terrain (Fig. 7).

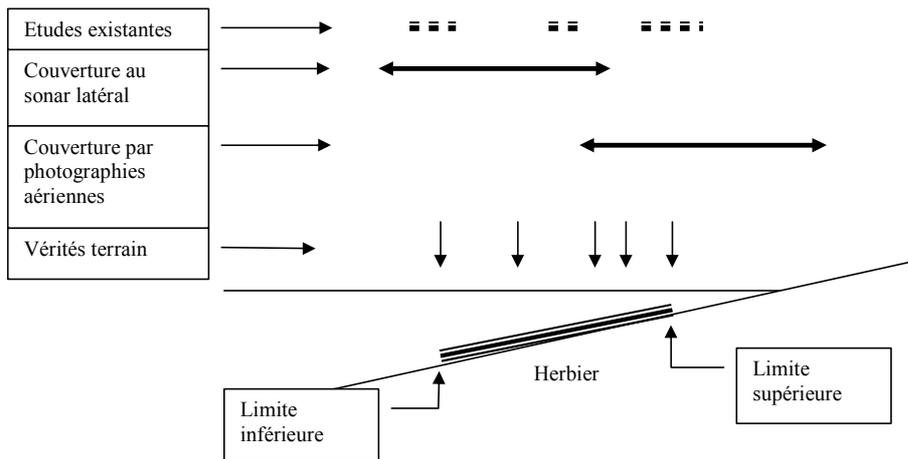


Figure 7. Répartition des investigations pour la connaissance de l'herbier de posidonie en vue de sa cartographie

Globalement, la méthode suit une démarche articulée autour de trois grandes étapes (Fig. 8) portant sur :

- Etape 1 : l'acquisition de données de base
- Etape 2 : le traitement des données et la production d'information géographique
- Etape 3 : la restitution de l'information sous forme de cartes.

Les différentes données auxquelles la méthode fait appel, suivent une filière qui leur est propre depuis l'origine (étape 1), en parcourant les stades successifs de la démarche. Pour chacune d'elles, il s'agit, en effet, d'opérer la transformation (étape 2) de la donnée de base en information géographique représentative des thèmes caractéristiques de l'herbier. La cartographie (étape 3) est exécutée en fin de chaîne de traitement par suite de l'intégration des filières et mixage de l'information géographique qu'elles ont produites.

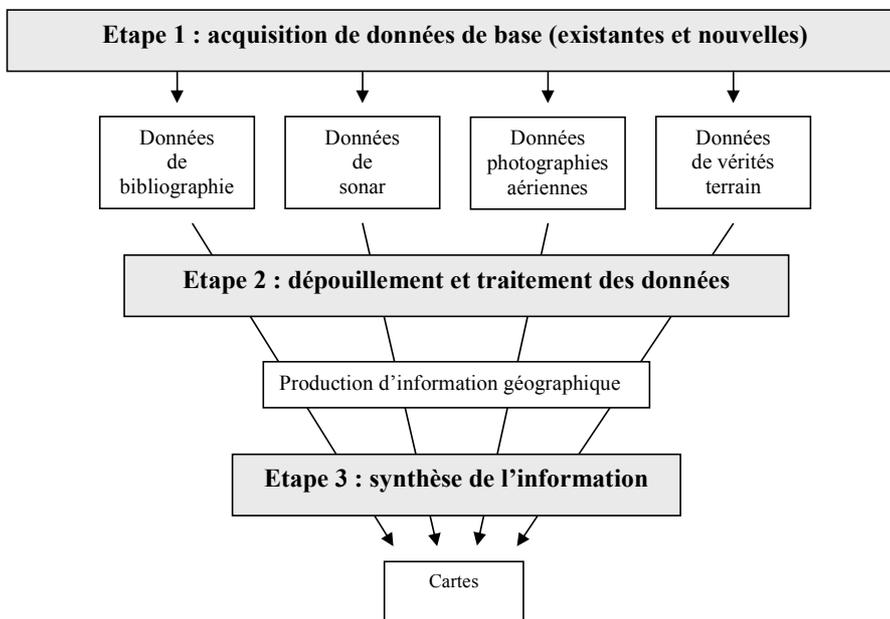


Figure 8. Schéma général de la stratégie menant à la cartographie de l'herbier

Chaque étape est réalisée au travers d'une succession de tâches élémentaires définies dans le tableau suivant (Tab. II).

Étapes	Tâches
<p>Étape 1 Acquisition de données de base</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Acquisition de données géoréférencées • Enregistrement • Sauvegarde (format, support, structure)
<p>Étape 2 Traitement des données et production d'information géographique</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Dépouillement • Corrections et calage géographiques • Harmonisation des formats et des systèmes de projection • Interprétation • Création d'information géographique
<p>Étape 3 Synthèse et restitution cartographique de l'information</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Intégration par croisement et mixage des différentes informations • Validation de l'information • Production des cartes

Tableau II. Tâches inhérentes aux trois étapes de la démarche de cartographie

4 Données nécessaires à la cartographie

Quelles données sont nécessaires pour la cartographie de l'herbier et par quels moyens les acquérir et les traiter ?

La complémentarité des données nécessaires impose une certaine chronologie dans le processus d'acquisition. La présentation qui suit, des moyens engagés, et des types de données produites, reflète cette chronologie.

Supprimé : La présentation qui suit, des moyens à engager pour cartographier les herbiers de posidonie, reflète cette chronologie. Cette présentation concerne, outre les moyens à mettre en œuvre, les types de données que ces derniers produisent.

4.1 Données cartographiques issues de la bibliographie

La recherche ciblée des données existantes relatives à l'herbier de Posidonie, même si elles ne sont pas exhaustives ni récentes, fournit un état des investigations réalisées sur ce compartiment biocénotique. Elle permet également de recenser les zones prioritaires à couvrir lors de nouvelles campagnes d'acquisition. Les bibliothèques universitaires ou d'instituts spécialisés sont à consulter en priorité.

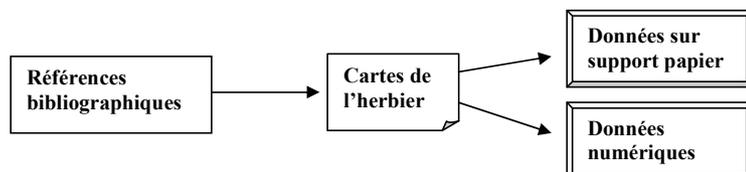
Par ailleurs, les résultats d'études disponibles sous forme cartographique qui présentent un intérêt particulier sont préférentiellement retenus. Une représentation cartographique des zones où l'herbier a été étudié, voire une restitution des cartes existantes est recommandée pour faciliter la visualisation des surfaces connues et, *a contrario*, des surfaces où il n'existe pas de données dans la littérature.

Il est proposé de répartir les données bibliographiques historiques selon trois périodes "avant 1900", entre "1900-1979" et "1980 à aujourd'hui", correspondant à des périodes durant lesquelles les techniques de levés cartographiques et de géoréférencement préférentiellement utilisées étaient différentes. La fiabilité des informations fournies par les cartes appartenant à ces différentes époques est variable, et elle devra être évaluée à l'aide d'un indice de fiabilité (voir paragraphe suivant). Seules les cartes les plus fiables de chaque période, voire parfois seules celles de la période la plus récente seront prises en compte pour l'expression des résultats en terme de tendances dynamiques de l'herbier (stabilité, régression, progression) et de vitalité.

Les données cartographiques obtenues à l'issue de cette recherche peuvent être de deux types :

- Données « papier », de nature non informatique
- Données numériques, de nature informatique, géoréférencées ou non géoréférencées.

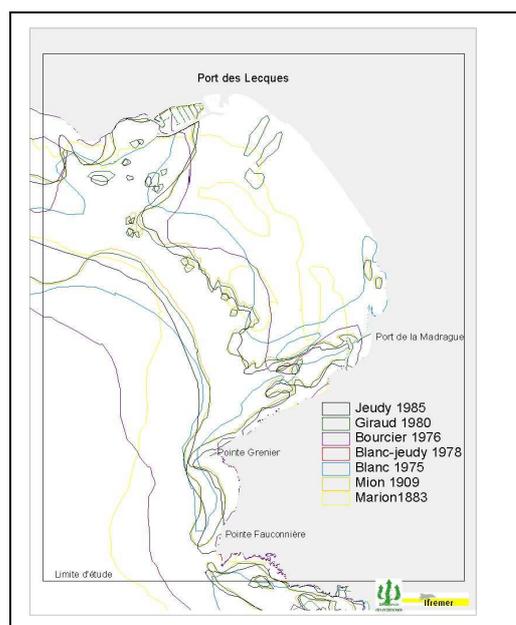
L'analyse des données sélectionnées doit permettre d'élaborer une base de connaissances utile pour l'orientation des interventions suivantes. En effet, ce type de bilan permet, en fonction de l'identification de secteurs pauvres ou sans données, de mieux orienter les investigations complémentaires à réaliser.



4.2 Indice de fiabilité des données bibliographiques

Les données cartographiques bibliographiques susceptibles d'être retenues sont d'échelle et d'âge variables (Fig. 9) et ont été acquises par l'utilisation de techniques différentes. La validité des informations qu'elles apportent n'est donc pas identique. Il est par conséquent indispensable d'attribuer à chaque carte ou secteur de carte un coefficient de fiabilité ou "indice de fiabilité" pondérant les informations qu'elles apportent.

Figure 9. Exemple de carte des connaissances bibliographiques de l'herbier de posidonie de la baie de ST. Cyr sur Mer (Var)



Cet indice s'étend sur une plage de valeur de 0 à 20, et est fonction des trois paramètres suivants : **(1) L'échelle de la carte** (noté sur 5) : suivant l'échelle de la carte, les données sont localisées plus ou moins précisément. De plus, si la zone prospectée est restreinte, il est probable qu'un effort particulier d'observation a été fait. Ainsi, plus l'échelle de la carte sera grande, plus on considérera l'information sur la nature et la limite des peuplements comme fiable. Nous avons défini 6 classes de fiabilité croissante (Tab. III). **(2) Le mode de positionnement** (noté sur 5) : ce paramètre prend en compte la qualité du positionnement de l'observation réalisée sur le terrain et de la retransmission cartographique. Les différentes techniques employées n'ont pas la même précision et, pour une même technique, la précision a pu évoluer au cours des années et des études. La note attribuée à la carte pour ce paramètre peut être nulle pour les cartes dressées avec des techniques de positionnement rudimentaires (estimation à vue de la distance à la côte par exemple) et sera maximale (5) pour une carte dont les observations auront été positionnées au mètre près sur un fond de carte géoréférencé grâce à un GPS différentiel. L'utilisation d'un GPS non différentiel (25 à 30 m maximum de précision) ou de levé de points d'amers pour la localisation des observations attribue à la carte pour ce paramètre une note de 4. Le cas des cartes dressées par la technique de traitement de photographies aériennes est plus complexe : la fiabilité de cette méthode, en ce qui concerne le positionnement, varie (de 0 à 5) en fonction de la correction effectuée sur les photographies et du référentiel utilisé pour le géoréférencement (Tab. IV). Une carte tirée de l'interprétation de photographies aériennes calées à l'aide d'orthophotoplans, référentiel très fiable, se verra attribuer la note maximale de 5. **(3) La méthode d'acquisition de l'observation** : ce paramètre prend en compte la fiabilité de l'observation en ce qui concerne la nature de l'observation et les risques d'extrapolation en ce qui concerne le placement des limites. Ainsi, on peut distinguer deux types de méthodes d'acquisition des données (Meinesz *et al.*, 1981). Le premier type concerne les méthodes qui nécessitent une vision rapprochée de l'herbier (transects en plongée sous marine ou en sous-marin), qui permettent de bien relever la nature des peuplements ou des fonds, voire de noter l'état de l'herbier, mais dont les positionnements ne sont précis que sur le parcours linéaire du plongeur ou du sous-marin. Les méthodes de dragage ou de balisage permettent également de déterminer précisément la nature d'un peuplement, mais son extension spatiale reste incertaine car sujette à extrapolation. La fiabilité attribuée à ces différentes méthodes dépend donc de la distance (maille) séparant les différentes observations (Tab. V). Le second type concerne les méthodes qui permettent d'obtenir une vue d'ensemble (photographie aérienne ou sonar latéral). Elles donnent des cartes très précises des contours de l'herbier, mais la nature des peuplements reste incertaine. Ces techniques nécessitent donc des plongées de terrain pour identifier certaines images ou pour connaître l'état de l'herbier, élément à prendre en compte pour définir la fiabilité de la méthode. La profondeur optimale d'utilisation de ces différentes méthodes varie entre 0 et -15 m pour les photographies aériennes et entre -5 m et la limite inférieure pour le sonar (Meinesz *et al.*, 1981), la fiabilité n'est donc pas forcément homogène sur

l'ensemble de la carte mais peut varier d'un point à un autre en fonction de la bathymétrie ou de la technique employée.

Exemple d'application de l'attribution d'un indice de fiabilité à une cartographie issue de la bibliographie (Bernard G. *et al.*, 1999)

Echelle de la carte	1 / 9000 ^{ème}	<i>Note (/5)</i>	4
Mode de positionnement			
<i>Tranche bathymétrique 0 à 5 m</i>	Calage d'après carte IGN digitalisée	<i>Note (/5)</i>	3
<i>Tranche bathymétrique de 5 à 15 m</i>	Calage d'après carte IGN digitalisée	<i>Note (/5)</i>	3
<i>Tranche bathymétrique de 15 à 40 m</i>	Amers	<i>Note (/5)</i>	4
Mode d'acquisition			
<i>Tranche bathymétrique 0 à 5 m</i>	Photographies aériennes Vérité terrain	<i>Note (/10)</i>	10
<i>Tranche bathymétrique de 5 à 15 m</i>	Photographies aériennes Vérité terrain	<i>Note (/10)</i>	10
<i>Tranche bathymétrique de 15 à 40 m</i>	Plongées	<i>Note (/10)</i>	5
		VALEUR DE L'INDICE DE FIABILITE (/20)	
<i>Tranche bathymétrique 0 à 5 m</i>		17	
<i>Tranche bathymétrique de 5 à 15 m</i>		17	
<i>Tranche bathymétrique de 15 à 40 m</i>		13	

Tableau III. Attribution de la note (/5) correspondant au paramètre "**échelle de la carte**" de l'indice de fiabilité des cartes anciennes.

Echelle (E)	$E \geq 1/500000$	$1/10000 < E \leq 1/500000$	$1/50000 < E \leq 1/100000$	$1/25000 < E \leq 1/50000$	$1/5000 < E \leq 1/25000$	$E \leq 1/5000$
Note (/5)	0	1	2	3	4	5

Tableau IV. Attribution de la note (/5) correspondant au paramètre "**mode de positionnement des données**" de l'indice de fiabilité des cartes anciennes (une note à attribuer par tranche bathymétrique 0-5 m, 5-15m et 15-40 m si le mode de positionnement utilisé change avec la profondeur).

Mode de positionnement	Aucun	Calage à partir de photographies aériennes		GPS Non Différentiel Amers	GPS Différentiel
Note (5)	0	Traitement de photographies d'échelle $\leq 1/2000^e$ sans correction	0	4	5
		Traitement de photographies d'échelle $> 1/2000^e$ sans correction	1		
		Traitement de photographies après correction géométrique d'après un trait de côte référencé	1 à 5 selon qualité du référentiel		
		Traitement de photographies après correction géométrique par entrée de points terrain relevés au GPS non différentiel	4		
		Traitement de photographies après correction géométrique par entrée de points terrain relevés au GPS différentiel	5		

Tableau V. Attribution de la note (/10) correspondant au paramètre "mode d'acquisition des données" de l'indice de fiabilité des cartes anciennes (une note à attribuer par tranche bathymétrique 0-5 m, 5-15m et 15-40 m).

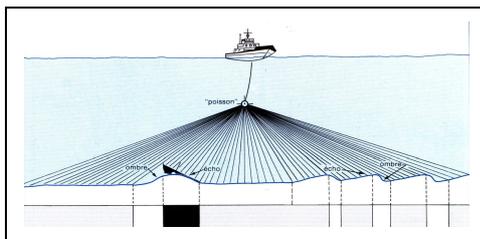
Profondeur de 0 à 5 m					
Mode d'acquisition	Sonar	Prélèvement, observations ponctuelles, balisage, etc.	Images satellites	Photographies aériennes ou Images satellites + vérités-terrain	Photographies aériennes + vérités terrain
Note (/10)	0	0 à 6 selon la maille (M)	6	8	10
		M ≥ 1000 m	0		
		1000 m > M ≥ 500 m	1		
		500 m > M ≥ 250 m	2		
		250 m > M ≥ 100 m	3		
		100 m > M ≥ 50 m	4		
		50 m > M ≥ 20 m	5		
		20 m > M	6		
PROFONDEUR DE 5 A 15 m					
Mode d'acquisition	Prélèvement, observations ponctuelles, balisage, etc.	Images satellites	Photographies aériennes ou Images satellites + vérités-terrain	Sonar	Photographies aériennes et/ou sonar+ vérités terrain
Note (/10)	0 à 6 selon la maille (M)	4	6	8	10
PROFONDEUR DE 15 A 40 m					
Mode d'acquisition	Photographies aériennes	Images satellites	Prélèvement, observations ponctuelles, balisage, etc.	Sonar	Sonar+ vérités terrain
Note (/10)	0	0	0 à 6 selon la maille (M)	8	10

4.3 Données sonar latéral

4.3.1 Principe de fonctionnement

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 étroit est émis du poisson remorqué, avec une incidence rasante, et intercepte le fond selon une fine bande s'évasant avec la distance (Fig. 10). A l'intérieur de cette zone, le signal émis, très court, délimite une zone insonifiée de faible dimension qui balaie progressivement toute la zone couverte. Le signal acoustique, de fréquence ultrasonique, émis par les deux transducteurs logés dans le poisson, est réfléchi avec plus ou moins d'intensité. L'écho ainsi recueilli au cours du temps est une représentation de la réflectivité du fond et surtout de la présence d'irrégularités ou d'obstacles qui sont « vus » par le signal très résolvant (Lurton, 1998).

Figure 10. Principe de fonctionnement du sonar à balayage latéral



4.3.2 Caractéristiques techniques

Les caractéristiques techniques des sonars latéraux portent d'abord sur la fréquence d'émission des ondes acoustiques, en rapport avec laquelle est déterminée la portée qui représente la largeur de balayage qui, doublée de part et d'autre de l'axe du levé, constitue la fauchée. En général, deux niveaux de fréquence sont offerts, haute et basse. La haute fréquence apporte plus de finesse dans les détails que la basse fréquence au détriment de la fauchée alors réduite à plus ou moins 70 m maximum. Le treuil qui gère l'immersion du poisson est équipé d'un câble qui assure à la fois le remorquage du poisson et la transmission de l'énergie nécessaire aux transducteurs ainsi, qu'en retour, les signaux reçus.

Modèle utilisé pour la mission POSICART

Le type utilisé en milieu côtier et opéré par la filiale GENAVIR 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 fourni 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>

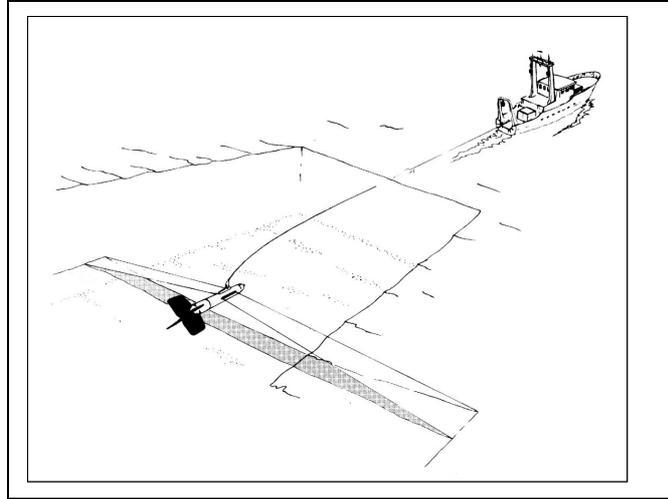
http://www.ifremer.fr/flotte/equipements_sc/equip_acoustiques.htm

Mise en forme : Pucés et numéros

4.3.3 Mise en oeuvre

Le sonar latéral est mis en œuvre à partir d'un navire côtier disposant d'une plage arrière dégagée, d'un local abrité pour le système d'acquisition et d'une source d'énergie (Fig. 11).

Figure 11. Mise en œuvre du sonar à balayage latéral



Il permet de visualiser en continu une image des fonds marins jusqu'à une profondeur de 150 mètres. Le poisson est maintenu à une altitude constante du fond par variation de la longueur du câble tracteur réglé à partir d'un treuil. L'altitude à respecter se situe entre 10 à 20 m. par rapport au fond pour une portée de 100 mètres (soit une fauchée de 200 m) couvrant ainsi environ 1 km²/heure. Les fonctions de réglages du poisson et de contrôle du fonctionnement général (acquisition des données) nécessitent la présence permanente d'un technicien spécialisé. Le sonar est remorqué à une vitesse comprise de 4/5 nœuds dans des conditions météorologiques qui ne doivent pas excéder force 5 Beaufort (mer de vent < 20 nœuds). Une fauchée de 200 à 300 m est réglée pour des prospections rapides, alors qu'une fauchée d'environ 100 m est requise pour effectuer une imagerie fine et les mosaïques. Pour ces dernières, des profils rectilignes et parallèles sont suivis avec un espacement de 75 m afin d'obtenir le recouvrement nécessaire au traitement ultérieur.

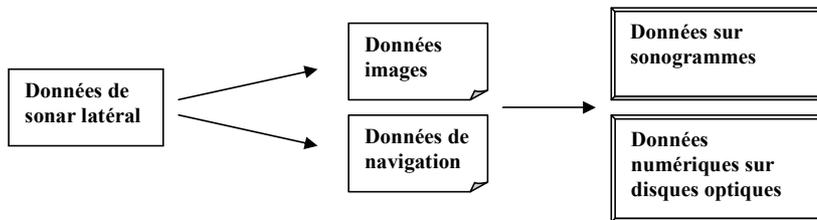
Mise en forme : Puces et numéros

4.3.4 Caractéristiques des données

L'image du fond est visualisée en temps réel sur le système d'acquisition (écran vidéo et enregistreur graphique), la rendant immédiatement utilisable grâce à :

- la correction automatique de la déformation latérale due à l'obliquité des trajets acoustiques,
- la correction automatique des variations d'altitude du poisson par rapport au fond,
- l'asservissement de la vitesse d'avancement du système de visualisation à la vitesse fond du navire.

Le signal acoustique est transcrit sur un sonogramme, comparable à une photographie aérienne, dont les teintes de gris varient selon les caractéristiques sédimentologiques, physiques et morphologiques des fonds. Il ne donne, par contre, aucune information sur leur nature, ce qui impose ultérieurement un calibrage des images par des vérités terrain.



Mise en forme : Pucés et numéros

4.3.5 Interprétation des données

Les ondes acoustiques émises par le sonar latéral reconnaissent la présence d'herbier de Posidonie par les micro-reliefs qu'il constitue et qui se détachent de la topographie du fond. Il distingue, en outre, l'environnement général de l'herbier, à savoir le caractère meuble (vase, sable ou gravier) ou dur des fonds (roche), la présence de mattes et tombants de mattes, voire aussi, des traces anthropiques dans l'herbier (mouillage, chalutage, etc.) ou des épaves.

Les levés au sonar latéral opérés à partir des navires océanographiques côtiers classiques, intervenant à partir de profondeurs de l'ordre de 15 m, couvrent la zone dite des herbiers profonds et permettent ainsi de visualiser leur limite inférieure.

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 filée, permet de situer sur fond de carte les informations thématiques relatives à l'herbier.

L'interprétation des images acoustiques peut s'effectuer par report manuel de l'information sur un fond de carte au 1/10 000^{ème} (niveau d'échelle moyen). Le traitement des sonogrammes est réalisé en deux temps : les grandes unités morphologiques en place sur le fond sont identifiées et reportées sur le fond de carte puis leur interprétation mène à leur qualification (herbier, mattes, zones de sable, etc.).

Ce travail met inmanquablement en évidence des secteurs de doutes, là où l'interprétation de certaines plages des sonogrammes est incertaine. Ces situations appellent alors à programmer des vérités terrain pour calibrer ou valider les informations attachées à ces secteurs. Elles sont réalisées soit par prélèvement de substrat, soit par plongée dans le cas particulier de l'herbier. Une maquette de carte de l'herbier est finalement élaborée (Fig. 12).

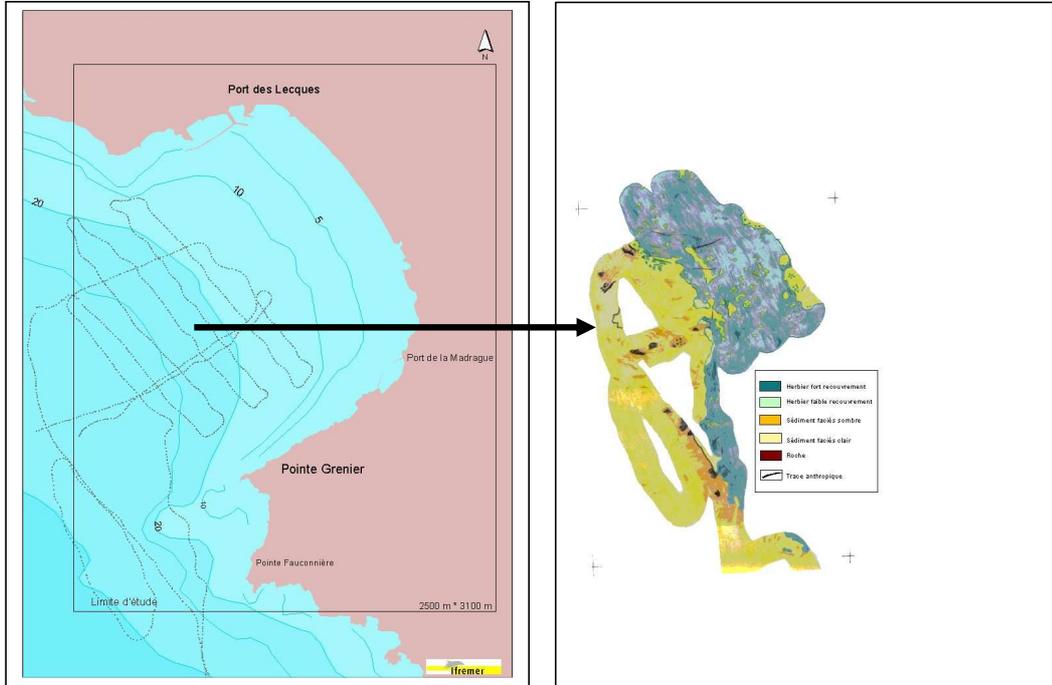


Figure 12. Maquette de carte de l'herbier élaborée à partir de l'interprétation des données sonar

Mise en forme : Puces et numéros

4.4 Données photographiques aériennes

Dans les petits fonds marins, la mise en œuvre du sonar latéral est délicate, à la fois pour des raisons de sécurité de navigation et de contraintes techniques de mise en œuvre. La méthode de cartographie s'appuie alors sur l'exploitation de photographies aériennes qui assurent ainsi le relais avec la couverture sonar.

Supprimé : précédente

Mise en forme : Puces et numéros

4.4.1 Principe et caractéristiques techniques

Les photographies aériennes sont devenues des outils classiques de cartographie des biocénoses marines à faible profondeur (de 0 à 15 m de profondeur au maximum). Ce type de document, parfaitement adapté aux usages cartographiques terrestres, révèle toutefois certaines limites en domaine marin : mauvaise pénétration en profondeur et mauvaise définition au niveau des fonds.

Supprimé : La photographie aérienne est un moyen très largement utilisé pour acquérir des connaissances sur toutes formes de territoires. Elle permet surtout de discriminer les différents types d'occupation, naturelle ou anthropique, de ces espaces.

Les clichés aériens possèdent un excellent piqué qui permet un agrandissement d'au moins dix fois sans perte de qualité. L'évolution vers la photographie numérique est maintenant engagée avec l'**accessibilité nouvelle** des caméras numériques.

4.4.2 Mise en œuvre

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). **Les chambres de prises de vues utilisées sont métriques et étalonnées, ce qui signifie qu'il est possible de tenir compte des déformations optiques. De taille très importante, pesant en général près de 200 kilogrammes, ces caméras sont embarquées dans les avions avec un ou plusieurs magasins de films. Le format spécifique des négatifs est de 24 cm x 24 cm.**

Supprimé : Les chambres de prises de vues utilisées pour la photographie aérienne sont métriques et étalonnées ce qui signifie qu'il est possible de tenir compte des déformations optiques. De taille très importante puisqu'elles pèsent en général près de 200 kilogrammes, ces caméras sont embarquées dans les avions avec un ou plusieurs magasins de films. Le format spécifique des négatifs est de 24 x 24 cm. Les photographies sont prises à partir d'une trappe spécialement découpée dans le fuselage de l'avion.

Supprimé : la montée en charge des prises de vues utilisant

Mise en forme : Pucés et numéros

La technique de vol est particulière car l'avion doit survoler par bandes successives des surfaces de terrain très précises. L'objectif est de photographier l'ensemble du terrain avec un recouvrement entre chaque cliché. Le recouvrement est la proportion de la surface commune entre un cliché et son voisin, sur la surface totale du cliché. Comme les prises de vues sont réalisées par bandes, on distingue deux taux de recouvrement : le recouvrement longitudinal de 60 % en général (entre deux images successives dans une même bande) et le recouvrement latéral variant de 20 à 30 % en général (entre deux images de deux bandes adjacentes). Dans une même bande, ce recouvrement entre clichés successifs de 60 % est indispensable pour passer aux stades de la stéréopréparation et de la restitution photogrammétrique menant à l'élaboration de la carte.

Les conditions de vol sont assez spécifiques et requièrent une excellente visibilité et un plafond très haut ; en moyenne 10 000 mètres pour un vol à 6 000 mètres et des clichés à une échelle voisine du 1/25 000^{ème}. La notion d'ombre portée est une contrainte supplémentaire qui réduit considérablement les créneaux de vol à un intervalle de temps où le soleil est au moins à 30° au dessus de l'horizon en général.

Supprimé :

Dans le cas du milieu marin, des spécifications très strictes sont à appliquer de façon à optimiser l'exploitabilité des prises de vues. Les clichés photographiques sont à réaliser conformément aux conditions de prises de vues pour l'étude des peuplements marins recommandées par Lefèvre *et al.* (1984) : 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. Ces contraintes font, qu'en général, des campagnes spéciales de prises de vues sont programmées.

**Exemple du protocole adopté pour les prises de vues de la baie de Saint Cyr
les Lecques et de la Côte Bleue :**

Chambre photogrammétrique ZEISS, format 23 cm * 23 cm, focale 152 mm	
Recouvrement des prises de vue	stéréoscopique longitudinal à 65 % +/- 5 % et latéral à 25 % +/- 5%
Distorsion radiale	inférieure à 15 µm à 140 mm du centre de l'image
Compensation du filet de l'image	inférieure à 5 µm
Dérive	Inférieure à 4° de la ligne de vol initial
Angle d'exposition	n'excède pas 3° d'écart par rapport à l'horizontale
Angle solaire	tient compte de l'angle de Brewster pour limiter au maximum la réflexion spéculaire
Film	AGA P 200 ou AVICHROME
Résolution	Egale ou supérieure à 90 lignes par millimètre
Avion.	PIPER AZTEC bi-moteur 500 cv IFR, spécialement équipé pour la prise de vue verticale
Système de navigation	GPS, couplé à un ordinateur de vol et un traceur de route vidéo, permettant un suivi parfait de chaque axe de vol et la confirmation de chaque axe
Date de prise de vue	21 juillet 2001
Nombre de photos	6
Altitude de prise de vue	325 m
Surface couverte par les photos	3 450 m * 3 450 m soit 11.9 km².

Mise en forme : Pucés et numéros

4.4.3 Caractéristiques des données

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 1/15 000^{ème} et 1/30 000^{ème}. A titre indicatif, la surface couverte utile par cliché est la suivante (Tab. VI) :

Tableau VI. Correspondance entre l'échelle et la surface couverte de photographies aériennes

Echelle	Surface couverte
1 : 20 000	4.6 km x 4.6 km
1 : 25 000	5.7 km x 5.7 km
1 : 30 000	6.9 km x 6.9 km

Nota : pour des applications côtières et plus localisées spatialement, l'échelle des photographies aériennes peut atteindre l'échelle dite cadastrale, aux alentours du 1/5 000^{ème}.

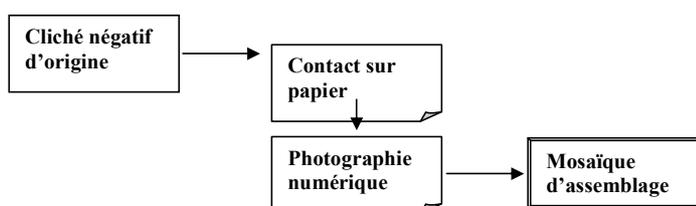
Des contacts sont aisément tirés de ces originaux. Ils correspondent au tirage sur papier photographique à l'échelle 1/1 et permettent d'avoir une vue d'ensemble du territoire couvert avec une précision relativement bonne. Des agrandissements sont toujours possibles pour visualiser des détails plus importants.

Aujourd'hui, le recours à la donnée numérique devient incontournable pour les traitements ultérieurs qui s'inscrivent dans le processus menant à la cartographie. Le procédé consiste à scanner les photographies aériennes selon un pas de scannage (dpi) compatible avec l'échelle originale de la photographie et celle de sortie, après grossissement (Tab. VII).

Tableau VII. Correspondances entre les échelles d'origine des photographies aériennes et les échelles de grossissement maximal admissibles.

Echelle d'origine de la mission	Pas de scannage	Grossissement échelle maximale voisine	Taille du fichier raster par km ²
1 : 30 000	200 dpi	1 : 15 000	0.2 Mo
	500 dpi	1 : 6 000	1.3 Mo
	1 000 dpi	1 : 3750	5.1 Mo
1 : 20 000	200 dpi	1 : 10 000	0.5 Mo
	500 dpi	1 : 4 000	2.9 Mo
	1 000 dpi	1 : 2 500	11.6 Mo
1 : 15 000	200 dpi	1 : 7 500	0.8 Mo
	500 dpi	1 : 3 000	5.2 Mo
	1 000 dpi	1 : 1 875	20.9 Mo

L'assemblage des clichés en mosaïque est facilité par le recours au support numérique. Ces mosaïques peuvent ainsi couvrir l'ensemble d'une zone objet d'étude.



4.4.4 Interprétation des données

Mise en forme : Puces et numéros

La visualisation à l'écran de la mosaïque de photographies aériennes numérisées permet d'observer et de distinguer dans la tranche d'eau couverte des différences de coloration. Ces plages correspondent à des entités physiographiques parmi lesquelles l'herbier est présent.

L'interprétation des photographies aériennes par une approche quantitative de la composition des petits fonds est donc réalisée en matérialisant les contours des zones identifiées. Une interprétation qualitative des zones délimitées complète ensuite cette première, au niveau des vérités terrain. L'interprétation des photographies aériennes est réalisée par polygonisation automatique à l'aide du logiciel ImageAnalysis⁷, ou équivalent, sur l'ensemble du secteur d'étude. Sur certains secteurs plus particuliers ou présentant une mosaïque de teinte plus diversifiée, une interprétation manuelle est réalisée en complément.

Les limites des peuplements correspondent aux changements brusques de teinte ou de densité lumineuse, de part et d'autre d'un contour plus ou moins régulier. Les zones de contact entre les différentes biocénoses apparaissent toutefois de façon variable. En effet, si une zone claire et blanche correspond généralement à une étendue de sable, une zone foncée peut traduire différents types de fonds, confondus entre eux sur la photographie (Boudouresque *et al.*, 1987) : herbier de posidonie, mattes mortes, peuplements d'algues sur roche ou tout simplement accumulation de feuilles mortes de posidonies (litière).

Selon la transparence des eaux, l'exploitation des données fournies par les photographies aériennes se limite à une profondeur de l'ordre de 15 à 20 m. Aussi, les photographies aériennes couvrent-elles la partie de l'herbier de surface en distinguant, en particulier, sa limite supérieure, tout en discriminant les faciès meubles ou rocheux environnants.

Pour ce qui concerne la thématique herbier, les informations recueillies sont de type surfacique. Elles fournissent ainsi la base des connaissances sur l'herbier de surface et, par voie de conséquence, une base de la cartographie de l'herbier, complémentaire à celle obtenue par sonar latéral (Fig. 13).

⁷ d'ESRI.

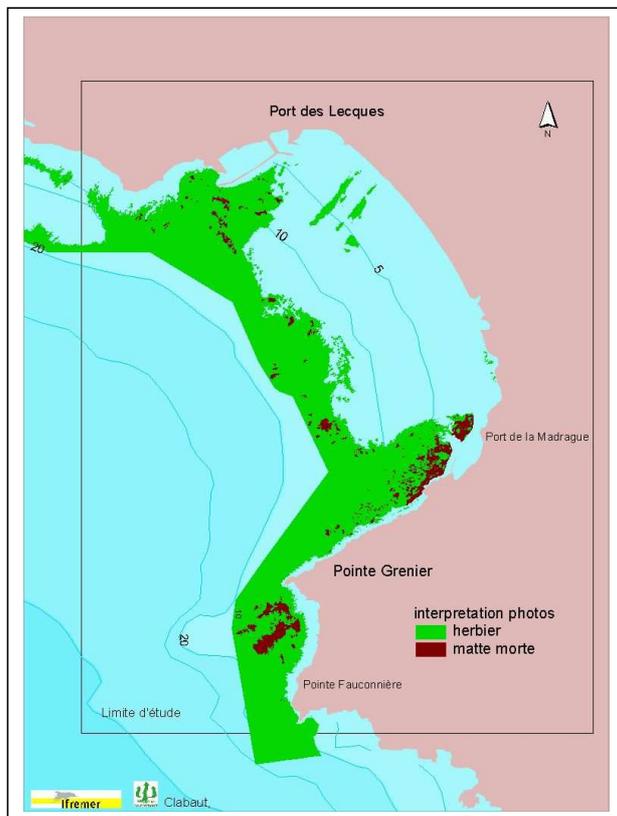


Figure 13. Exemple de maquette de carte de l'herbier élaborée à partir de photographies aériennes

Mise en forme : Pucés et numéros

4.5 Données acquises en plongée sous-marine

Une première série d'interventions en plongée sous-marine a pour but, par observation *in situ*, de valider certaines données sonar ou vidéo ou de combler certaines zones non renseignées. Ces plongées permettent de reconnaître la nature des fonds et de caractériser les peuplements qui les occupent. Le choix de leur répartition géographique est principalement dicté par l'état des connaissances, fourni par la bibliographie, le traitement des photographies aériennes et les résultats d'investigations au sonar latéral. Dans un second temps, des plongées spécifiques, permettent, à l'aide de paramètres standardisés, d'évaluer l'état de vitalité et la dynamique de l'herbier de Posidonie.

Mis en forme

Supprimé : par observation in situ



L'optimisation des moyens mis en œuvre pour les interventions en plongée sous-marine⁸ implique de mener les différents types d'investigation, vérités terrain et évaluation de la dynamique de l'herbier, dans le même temps. Les investigations sont spatialement localisées, le long de transects matérialisés (gradués) sur le fond, eux-mêmes positionnés à l'aide d'un GPS. Les données recueillies peuvent, de ce fait, être intégrées au SIG.

Mise en forme : Puces et numéros

4.5.1 Vérités terrain

Les validations, en plongée sous-marine, des images obtenues par le traitement des sonogrammes et des photographies aériennes permettent de caractériser les types de fond, et de préciser la présence ou non d'herbier de Posidonie. La localisation des points de validation est définie au préalable, en fonction des éléments obtenus par les filières bibliographie, sonar latéral et photographie aérienne : Il peut s'agir de zones d'ombre, de doutes quant à l'interprétation du signal, ou de zones dépourvues de données.

Les points de validation sont précisément localisés par GPS et le report cartographique des observations effectuées permet de compléter les maquettes de carte obtenues à partir du sonar latéral et des photographies aériennes.

Dans le cas de types de fond particulièrement complexes (fort relief, mosaïques de biocénoses ou de substrats, etc.) les validations terrain peuvent être menées en parallèle au traitement des sonogrammes et des photographies aériennes et aider ainsi à leur interprétation. Il peut s'agir, par exemple, de différencier des brondes rocheuses profondes et des tombants érosifs de matre, ou des traces anthropiques (chenaux de matre creusés par le passage de chaluts).

Le long de chaque transect de prospection en plongée sous-marine, la bathymétrie, la typologie de l'herbier de posidonie (herbier continu ou morcelé, herbier de plaine, herbier de colline, etc.⁹) et des fonds traversés (mattes mortes, intermattes érosives, chenaux sagittaux, lobes de décharge) sont notés, sur une vingtaine de mètres de largeur.

Mise en forme : Puces et numéros

4.5.2 Etat de vitalité et dynamique de l'herbier

L'estimation de l'état de vitalité de l'herbier de posidonie fait appel à plusieurs paramètres standardisés dont les principaux ont été retenus dans le cadre de ce guide :

⁸ Les plongeurs scientifiques intervenants en plongée sous-marine doivent être titulaires du Brevet d'Aptitude au travail en conditions Hyperbares, Classes I et II, mention B. Ils interviennent à 4 personnes, équipe minimum requise dans le cadre de la législation du travail (arrêté du 28 mars 1990).
⁹ Ces différents types d'herbier correspondent à des critères de morphologie, clairement identifiés, ils sont définis dans le § 2.3

recouvrement de l'herbier sur le fond, densité des faisceaux de feuilles, déchaussement des rhizomes, proportion de rhizomes plagiotropes, importance du broutage des feuilles et épiphytisme.

Parmi ces paramètres, le recouvrement et la densité font 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.

4.5.2.1 Mesure de la densité de l'herbier

La densité correspond au nombre de faisceaux de Posidonies présents par unité de surface, généralement le mètre carré. Selon les herbiers, leur densité varie en fonction de la profondeur et des conditions du milieu (lumière, type de substrat où l'herbier est implanté). Du fait de l'intensité lumineuse élevée près de la surface, un herbier présentera des valeurs de densité très élevées dans des secteurs superficiels, alors qu'elles seront beaucoup plus faibles en profondeur (limite inférieure) ou dans des zones présentant une turbidité élevée (Pergent *et al.*, 1995).

Classification de l'herbier par la densité des faisceaux de feuilles Première tentative

La première tentative de classification de l'herbier de Posidonie en fonction de la densité de faisceaux de feuilles a été établie par Giraud en 1977. Il classait ainsi l'herbier en six différents types : herbier très dense, dense, clairsemé, très clairsemé, semi-herbier, faisceaux isolés.

Densité par m ²	Type d'herbier
- plus de 700 faisceaux/m ²	Type I, herbier très dense
- de 400 à 700 faisceaux/m ²	Type II, herbier dense
- de 300 à 400 faisceaux/m ²	Type III, herbier clairsemé
- de 150 à 300 faisceaux/m ²	Type IV, herbier très clairsemé
- de 50 à 150 faisceaux/m ²	Type V, semi herbier
- moins de 50 faisceaux/m ²	Faisceaux isolés

La densité est mesurée au hasard dans l'herbier, au moyen d'un quadrat de 20 cm de côté (surface minimale garantissant la représentativité de la mesure *in Panayotidis et al.*, 1981), avec 3 à 5 mesures¹⁰, pour une station donnée, permettant d'apprécier la variabilité. La classification proposée par Pergent *et al.* (1995) à partir d'une synthèse des données

¹⁰ Pour les limites inférieures très profondes (au delà de -35 m), 2 mesures au lieu de 3 sont réalisées, compte tenu de la durée limitée des plongées (paliers de décompression).

disponibles, et intégrant la profondeur, a été utilisée. La variabilité du facteur densité est expliquée à 54% par la profondeur¹¹ (qui intègre également la pénétration de la lumière). A partir de ce modèle, une grille de lecture simplifiée a été proposée et classe l'herbier en quatre catégories, selon les valeurs de densité mesurées en fonction de la profondeur : densité anormale, sub-normale inférieure, normale, sub-normale supérieure (Tabl. VIII). Parmi celles-ci, deux seulement seront retenues pour la représentation cartographique, à savoir la densité normale et la densité anormale.

Tableau VIII. Classification de l'herbier en fonction de la profondeur (Prof., en mètres). DA = densité anormale, DSI = densité sub-normale inférieure, DN = densité normale (en gras), DSS = densité sub-normale supérieure (d'après Pergent-Martini, 1994 et Pergent *et al.*, 1995).

Prof.	DA	DSI	DN	DSS	Prof.	DA	DSI	DN	DSS
1	← 822 ↔		934 ↔ 1158	→	21	← 48 ↔		160 ↔ 384	→
2	← 646 ↔		758 ↔ 982	→	22	← 37 ↔		149 ↔ 373	→
3	← 543 ↔		655 ↔ 879	→	23	← 25 ↔		137 ↔ 361	→
4	← 470 ↔		582 ↔ 806	→	24	← 14 ↔		126 ↔ 350	→
5	← 413 ↔		525 ↔ 749	→	25	← 4 ↔		116 ↔ 340	→
6	← 367 ↔		479 ↔ 703	→	26		↔	106 ↔ 330	→
7	← 327 ↔		439 ↔ 663	→	27		↔	96 ↔ 320	→
8	← 294 ↔		406 ↔ 630	→	28		↔	87 ↔ 311	→
9	← 264 ↔		376 ↔ 600	→	29		↔	78 ↔ 302	→
10	← 237 ↔		349 ↔ 573	→	30		↔	70 ↔ 294	→
11	← 213 ↔		325 ↔ 549	→	31		↔	61 ↔ 285	→
12	← 191 ↔		303 ↔ 527	→	32		↔	53 ↔ 277	→
13	← 170 ↔		282 ↔ 506	→	33		↔	46 ↔ 270	→
14	← 151 ↔		263 ↔ 487	→	34		↔	38 ↔ 262	→
15	← 134 ↔		246 ↔ 470	→	35		↔	31 ↔ 255	→
16	← 117 ↔		229 ↔ 453	→	36		↔	23 ↔ 247	→
17	← 102 ↔		214 ↔ 438	→	37		↔	16 ↔ 240	→
18	← 88 ↔		200 ↔ 424	→	38		↔	10 ↔ 234	→
19	← 74 ↔		186 ↔ 410	→	39		↔	3 ↔ 227	→
20	← 61 ↔		173 ↔ 397	→	40		↔	↔ 221	→

4.5.2.2 Mesure du déchaussement des rhizomes

Le déchaussement des rhizomes traduit généralement l'existence d'un déficit sédimentaire de l'herbier. La mesure de ce paramètre permet donc d'apprécier rapidement et assez précisément l'hydrodynamisme d'une zone et les déplacements sédimentaires qui y ont lieu. En outre, un déchaussement important entraîne une fragilisation de l'herbier, ce qui accroît sa vulnérabilité vis à vis des actions de mouillages et de chalutage. La mesure du

¹¹ Les 46% de variabilité restant sont liés à d'autres paramètres comme la turbidité moyenne, la pollution, l'hydrodynamisme ou la nature du substrat (Pergent-Martini, 1994).

déchaussement des rhizomes est réalisée selon les conventions définies par Boudouresque *et al.* (1980) :

- Pour les rhizomes plagiotropes, le déchaussement est la distance qui sépare le sédiment de la partie inférieure des rhizomes ;
- Pour les rhizomes orthotropes, le déchaussement est la distance qui sépare le sédiment de la base des feuilles, distance à laquelle on soustrait 2 cm.

Le déchaussement est mesuré à la base des faisceaux selon 5 mesures réparties de façon aléatoire par station. Une échelle d'évaluation du déchaussement, selon 3 niveaux faible, moyen, important, (Tabl. IX) est utilisée dans le cadre du Réseau de Surveillance Posidonie « RSP » (guide méthodologique).

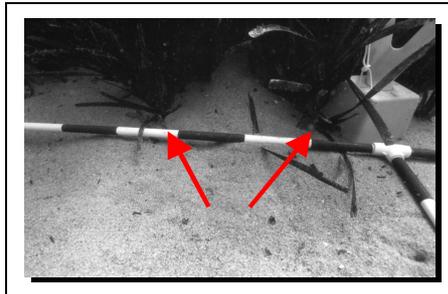
Tableau IX. Echelle d'évaluation du déchaussement en fonction des valeurs moyennes mesurées le long du balisage.

Déchaussement (valeurs seuils)	Interprétation
Inférieur à 5 cm	Déchaussement faible
5-15 cm	Déchaussement moyen
Supérieur à 15 cm	Déchaussement important

4.5.2.3 Pourcentage de rhizomes plagiotropes

En limite d'herbier ou en bordure des taches et îlots de Posidonies, la présence de nombreux rhizomes plagiotropes traçants (croissance horizontale) est un indice de bonne vitalité de l'herbier, car elle traduit une tendance à la progression¹² (flèches rouges sur la photo © E. Charbonnel, RSP). La position majoritaire des rhizomes de Posidonies est donc notée et la proportion (en pourcentage) de rhizomes plagiotropes est estimée en bordure d'herbier.

Selon les pourcentages de rhizomes plagiotropes obtenus, une échelle d'interprétation est utilisée dans le cadre du RSP (Tabl. X).



¹² Inversement, un pourcentage élevé de rhizomes plagiotropes au sein même de l'herbier peut traduire une réponse de l'herbier à un stress, causé par exemple par une pression de mouillage élevée (Francour *et al.*, 1997).

Tableau X. Interprétation de la vitalité de l'herbier (tendance à la progression) en fonction des pourcentages moyens de rhizomes plagiotropes mesurés en limite supérieure d'herbier.

Pourcentage de rhizomes plagiotropes (valeurs seuils)	Interprétation
Inférieur à 30%	Herbier généralement stable, avec peu ou pas de progression
30 % à 70%	Légère tendance à la progression
Supérieur à 70%	Nette tendance à la progression

4.5.2.4 Estimation du recouvrement de l'herbier

Le recouvrement correspond au pourcentage de couverture du substrat par l'herbier de Posidonie vivant, par rapport aux zones non couvertes (sable, matte morte, roche). Les valeurs de recouvrement varient selon l'état de vitalité de l'herbier. Dans le cas d'un herbier continu, présentant une vitalité élevée, le recouvrement atteint 80 à 100%. Le recouvrement présente des valeurs plus faibles avec la profondeur, et lorsque l'herbier est soumis à des conditions de développement moins favorables : proximité de zones perturbées par des aménagements ou des rejets.

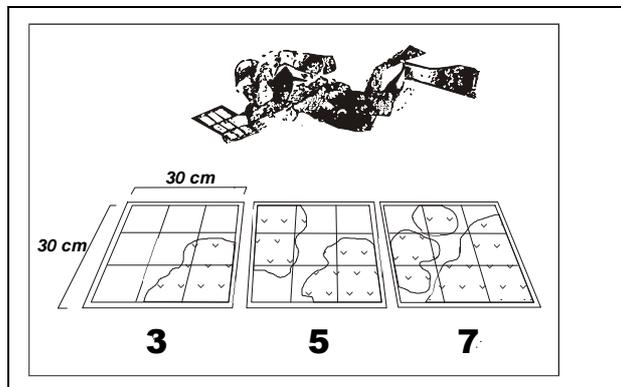
Les méthodes actuellement utilisées pour estimer le recouvrement reposent sur des évaluations subjectives (susceptibles de varier d'un observateur à l'autre), soit par évaluation visuelle directe, soit par une méthode originale initiée en 1995 par l'équipe du GIS Posidonie, dans le cadre du système de surveillance de la baie du Prado (Marseille ; Gravez *et al.* 1995). L'observateur vise le fond à travers une plaquette de PVC transparente de 30 cm x 30 cm, divisée en un carroyage de 10 cm de côté (9 carreaux au total, Fig. 14). L'estimation du recouvrement de l'herbier sur le fond est réalisée en s'appuyant sur la proportion de posidonies visibles à travers le quadrillage de la plaque transparente. Cette proportion est ensuite exprimée en pourcentage. La mesure est réalisée à la verticale du point observé, à 3 mètres au dessus du fond, une trentaine de mesures est effectuée dans chaque station.

Une échelle d'évaluation du recouvrement le long des limites de l'herbier (faible, moyen, fort) est utilisée dans le cadre du RSP (Tabl. XI), en fonction des valeurs moyennes mesurées ou estimées. Les valeurs seuils considérées par cette échelle sont différentes selon la position de la limite (supérieure ou inférieure), puisque le recouvrement diminue de façon naturelle avec la profondeur.

Tableau XI. Interprétation de la vitalité de l'herbier (tendance à la progression) en fonction des pourcentages de recouvrement moyens mesurés ou estimés le long du balisage en limite supérieure d'herbier.

Pourcentage de recouvrement (valeurs seuils)		
Limite supérieure	Limite inférieure	Interprétation
Inférieur à 40%	Inférieur à 20 %	Faible recouvrement
40 % à 80 %	20 % à 50 %	Recouvrement moyen
Supérieur à 80 %	Supérieur à 50 %	Fort recouvrement

Figure 14. Méthode d'évaluation du recouvrement de l'herbier de Posidonie sur le substrat. Dimensions de la plaquette transparente (en cm) et exemple de notation (3, 5, 7) lors de l'évaluation. Au dessus, un observateur en situation, situé à 3 m au dessus de l'herbier (d'après Gravez *et al.*, 1995).



4.5.2.5 Evaluation de la dynamique de l'herbier de Posidonie

Les paramètres spécifiques : densités de faisceaux, recouvrement, proportion de rhizomes plagiotropes, mesurés, *in situ* en plongée sous-marine, le long des marges de l'herbier de Posidonie permettent une première estimation de la dynamique de l'herbier, et de son caractère évolutif. On distingue ainsi 4 principaux types de limites : progressive, franche, érosive et régressive (Meinesz & Laurent, 1978 ; Fig. 15) :

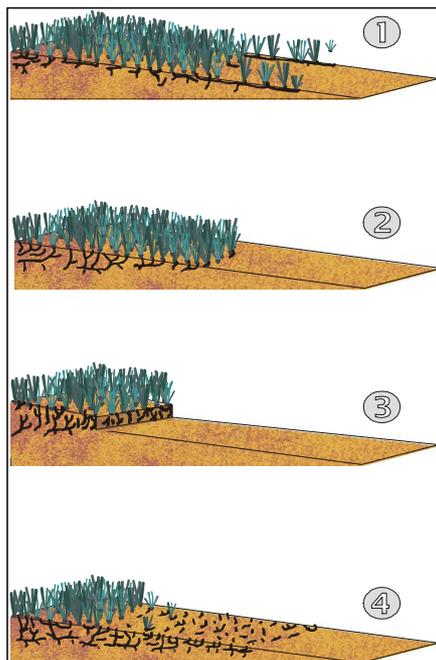


Figure 15. Présentation des différents types de limite inférieure de l'herbier de Posidonie (d'après Meinesz & Laurent, 1978, modifié par Boudouresque, redessiné par Palluy, inédit). 1 = limite progressive; 2 = limite franche ; 3 = limite érosive ; 4 = limite régressive.

1. Les limites **progressives** sont caractérisées par la présence de rhizomes plagiotropes (croissance horizontale), disposés de façon parallèle dans le sens de la pente. L'herbier n'édifie pas de matte, mais il colonise un substrat situé plus profondément.
2. Les limites **franches** sont brusques, bien nettes entre les derniers rhizomes de Posidonies et le sédiment (absence de matte morte en aval de la limite). Elle sont caractérisées par la présence de rhizomes généralement orthotropes (à croissance verticale), sans édification d'une véritable matte et traduisent souvent un herbier stable, avec des conditions de milieu stabilisées.
3. Les limites **érosives** sont caractérisées par un tombant de matte qui marque la limite entre les Posidonies et le sédiment. La formation de ce tombant de matte, de hauteur variable (20 cm à 1 m), résulte de l'hydrodynamisme. L'action des courants de fonds érode l'herbier et interdit toute progression vers de plus grandes profondeurs.
4. Enfin, les limites **régressives** sont caractérisées par la présence d'une étendue de matte morte, recouverte ou non par le sédiment, en aval de la limite de l'herbier proprement dite. Quelques faisceaux de feuilles, témoins de l'ancienne position de l'herbier, subsistent en aval de la limite actuelle. Ce type de limite traduit une régression d'herbier. En limite supérieure d'herbier, on peut également observer un morcellement de l'herbier, en taches et îlots de posidonie, parfois même faisceaux isolés, sous l'action de facteurs de déséquilibres (comme la présence d'un rejet, ou d'une zone de mouillage).

Dans un second temps, d'autres paramètres, comme la présence de matte morte en aval de la limite de l'herbier, ou l'examen des cartes anciennes issues de la littérature et leur comparaison avec les derniers résultats obtenus, sont pris en considération pour évaluer l'évolution de l'herbier de posidonie au cours des trente dernières années. Celle-ci sera exprimée en terme de « stabilité ou progression » et « régression ».

4.5.2.6 Faune et flore associées

Une attention particulière est portée aux principales espèces accompagnatrices de l'herbier où pouvant être rencontrées au voisinage des sites étudiés (Tabl. XII) : espèces protégées en France (*ex.* la grande nacre *Pinna nobilis*), menacées, d'intérêt patrimonial ; aux espèces de poissons et d'échinodermes présentant un intérêt commercial pour la pêche ou encore aux espèces invasives d'origine tropicale, comme l'algue verte *Caulerpa taxifolia*, dont l'expansion constitue un risque majeur pour les écosystèmes de Méditerranée (recommandations d'Héraklion, PNUE 1998).

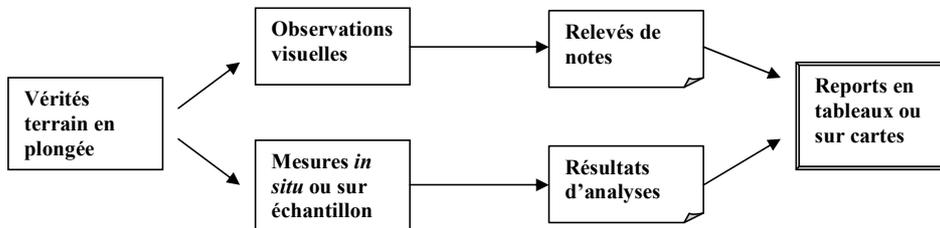
Tableau XII. Liste des espèces accompagnatrices de l'herbier où pouvant être rencontrées au voisinage des sites étudiés et paramètres à considérer lors des observations.

Liste des Espèces	Paramètres à considérer
<p>Espèces protégées :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Phanérogames : Cymodocée (<i>Cymodocea nodosa</i>), Zostères (<i>Zostera noltii</i>, <i>Z. marina</i>) - Grande nacre (<i>Pinna nobilis</i>) - Mérour brun (<i>Epinephelus marginatus</i>) - Oursin diadème (<i>Centrostephanus longispinus</i>) - Grande cigale (<i>Scyllarides latus</i>) - Datte de mer (<i>Lithophaga lithophaga</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> - Superficie couverte, description (prairie clairsemée/dense, longueur feuille, profondeur) - Nombre et dimension (hauteur, largeur), biotope (herbier, matte morte, sable), profondeur - Nombre et estimation taille, comportement (indifférence, fuite, curiosité), profondeur - Nombre et diamètre (sans les piquants), biotope (roche, coralligène, cavité), profondeur - Nombre et taille, profondeur, biotope - Description (biotope, profondeur) et abondance (rare/fréquente/abondante)
<p>Espèces invasives :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Caulerpe tropicale (<i>Caulerpa taxifolia</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> - Superficie couverte, colonie isolée ou tache, substrat (sable, roche, matte morte, herbier), profondeur

4.5.3 Caractéristique des données

Les données sont acquises manuellement *in situ*, et reportées sur des supports adaptés. Les observations effectuées durant les vérités terrain, sont précisément localisées (positionnement au D-GPS) et peuvent donc être positionnées sur le SIG, pour compléter les maquettes de carte de l'herbier issues des données du sonar et des photographies aériennes.

Les données chiffrées de densité, recouvrement et déchaussement sont intégrées au SIG en une couche « paramètres de vitalité » sous forme de table attributaire, pour chaque station de relevés.



5 Elaboration du SIG et des cartes

Quelle procédure de traitement des données suivre pour parvenir à la construction des cartes de l'herbier ?

5.1 Méthode générale de construction des cartes

La cartographie est l'étape ultime de la démarche au niveau de laquelle, les résultats des tâches réalisées lors des étapes précédentes convergent et sont intégrés. En particulier, elle vise à exprimer et à représenter les données attachées aux paramètres qui caractérisent l'herbier. Il s'agit, en l'occurrence, de traduire en une information géographique, de type surfacique et ponctuel, les paramètres retenus pour représenter l'herbier (surface, indice de vitalité, dynamique).

L'étape cartographique implique de suivre un processus méthodologique rigoureux et de respecter des principes de cohérence qui concourent à la qualité des produits cartographiques attendus. Ce travail fait appel à des outils spécialisés, de type SIG, dédiés à l'exploitation de données géoréférencées (ou d'information géographique) et destinés à leur restitution cartographique.

Enfin, le propre du guide consiste, à ce niveau, à fournir les spécifications techniques nécessaires et suffisantes à la réalisation de cartes de l'herbier de Posidonie.

Selon le schéma général présenté au chapitre 3 du guide (cf. figure 8), chaque filière prend en charge la transformation des données interprétées issues des données brutes d'origine, en information géographique, sous une forme qui en facilite l'intégration et la restitution cartographique. La carte finale ainsi produite est issue d'un mixage des informations provenant des quatre filières suivies. Chaque filière assure donc son propre processus de traitement pour déboucher sur une information géographique acceptant sa mise en commun avec les autres.

La méthode adoptée et suivie pour parvenir au résultat cartographique recherché est illustrée par le schéma suivant (Fig. 16) :

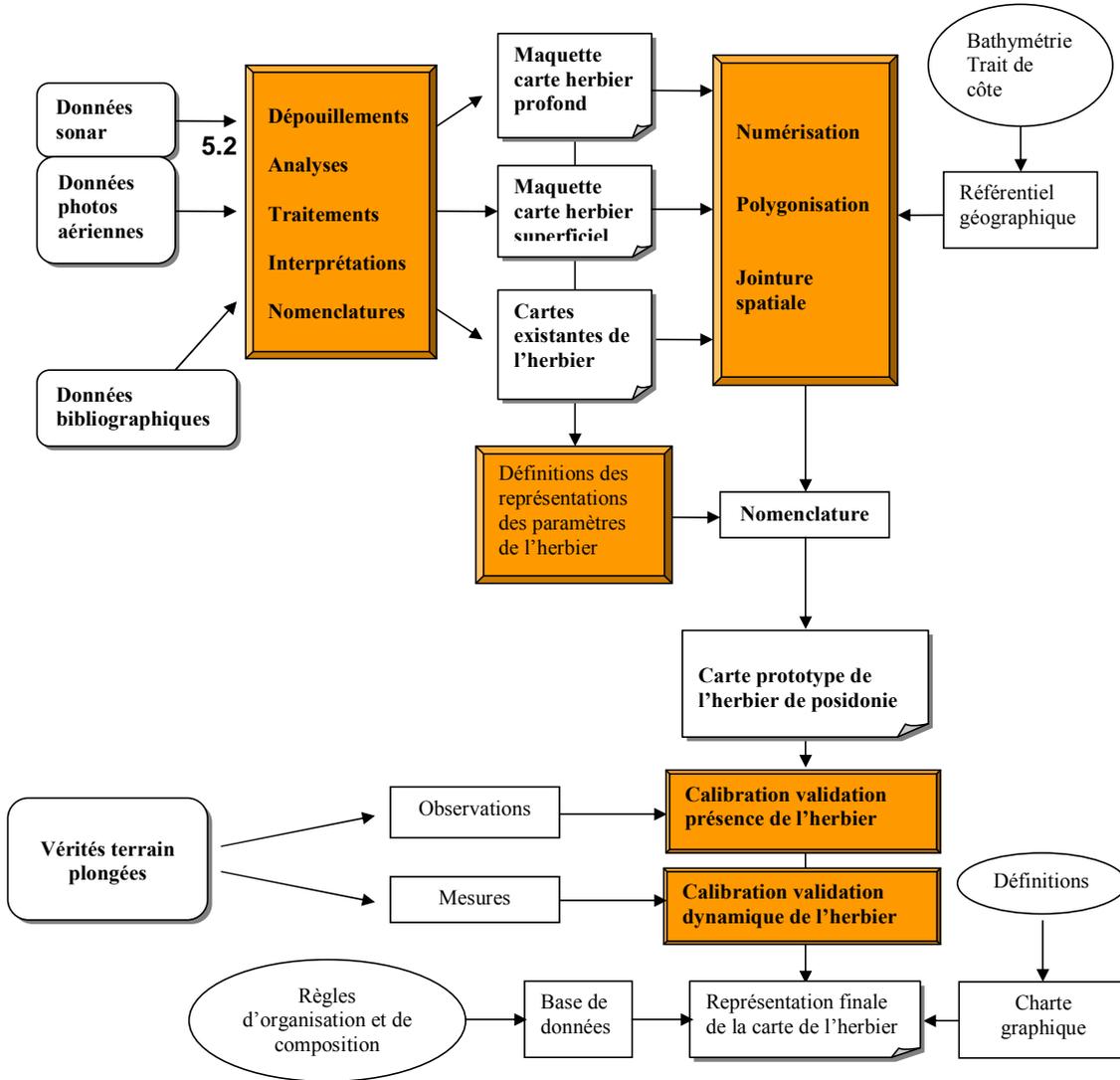


Figure 16. Schéma de la démarche générale de construction des cartes de l'herbier

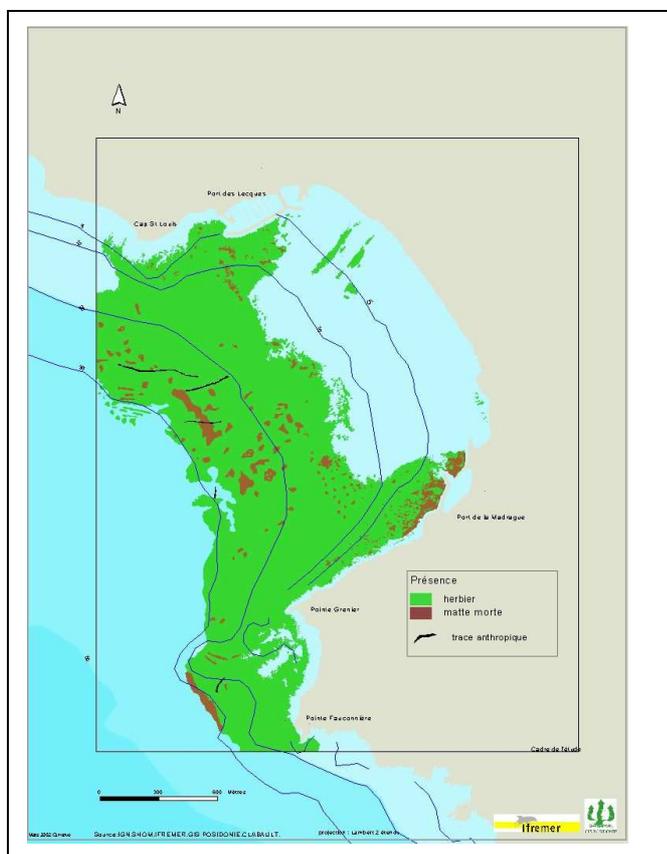
Elaboration de l'information géographique

L'objet de la cartographie de l'herbier est de représenter sa répartition spatiale, inscrite dans ses limites supérieure et inférieure actuelles, complétée par des paramètres relatifs à sa dynamique.

5.2.1 Répartition spatiale de l'herbier

Cette information, surfacique, provient de deux sources d'information géographique. L'une, issue du traitement des photographies aériennes, permet de délimiter l'herbier dans sa limite supérieure et, l'autre, issue du traitement des données sonar, couvre l'herbier dans sa partie inférieure. La fusion de ces deux informations produit une information géographique unique sur la présence d'herbier dans ses limites supérieure et inférieure (Fig. 17).

Figure 17. Répartition spatiale (présence) de l'herbier de la baie de St. Cyr sur Mer (Var).



5.2.2 Dynamique de l'herbier

La représentation cartographique des paramètres de vitalité de l'herbier de posidonie est réalisée par un zonage de l'herbier basé sur le recouvrement de l'herbier sur le fond et la densité de faisceaux¹³.

Pour le recouvrement, trois classes sont retenues, de 0-25% , 25-75% et 75-100%. Les valeurs ponctuelles mesurées *in situ* permettent d'amorcer la délimitation des zones correspondant aux différentes classes de recouvrement. L'analyse de la répartition spatiale de l'herbier (présence/absence, intermattes, etc.) permet de compléter et d'étendre ce découpage à l'ensemble de la zone étudiée. En effet, l'importance des moyens à mettre en oeuvre pour effectuer des mesures sur le terrain, permet rarement de couvrir de façon exhaustive l'ensemble d'une zone étudiée. Ainsi, lorsqu'une zone d'herbier présente une configuration particulière (nombreuses intermattes, herbier morcelé, configuration particulière du substrat, etc.) et que l'on ne dispose pas de valeurs de recouvrement estimées, l'appartenance de cette zone à l'une des trois classes définies plus haut est évaluée par un calcul de proportion de surface d'herbier vivant/matte morte.

Ce type de découpage cartographique proposé est une première tentative de représentation de la notion de recouvrement. A ce stade, elle nécessite de prendre toutes les précautions suffisantes dans l'interprétation de ses résultats. Cette méthode demande à être perfectionnée ; la multiplication des mesures de terrain grâce au développement de nouveaux outils de reconnaissance et d'observation sous marine (caméra vidéo numérique) pourra permettre une interprétation plus fine, voire une interpolation statistique (outils de géostatistique).

Pour les densités, le zonage de l'herbier est basé sur deux classes : densités normales et densités anormales (selon l'échelle de Pergent *et al.*, 1995). Le principe adopté est analogue à celui utilisé dans le cas du recouvrement.

En fonction des paramètres mesurés *in situ*, et de l'appréciation subjective de la dynamique observée dans l'herbier de Posidonie : morcellement, type de limite, envasement ou ensablement, déchaussement, présence de matte morte en aval des limites, une tendance évolutive (stabilité-progression, régression-disparition) est attribuée aux secteurs de l'herbier les plus susceptibles d'évoluer : les marges, les limites supérieures et inférieures, les zones de frontière entre la matte morte et l'herbier vivant, les zones de fort morcellement, etc.

¹³ Se reporter au § 4.5.2 pour la méthodologie d'acquisition des données de recouvrement et de densité

La comparaison des contours actuels de l'herbier avec les photographies aériennes anciennes et les cartes historiques issues de la littérature peut permettre, dans un second temps, de confirmer la tendance évolutive observée *in situ* :

1. stabilité de l'herbier ou progression ;
2. régression.

Cette tendance est représentée cartographiquement, par des symboles spécifiques placés dans les secteurs dont la dynamique a pu être mise en évidence.

Mise en forme : Pucés et numéros

5.3 Principes de cohérence

Quatre filières de données complémentaires sont ainsi adoptées et suivies pour parvenir, après convergence, à l'information thématique recherchée sur l'herbier de Posidonie. La transformation des données, depuis leur acquisition jusqu'à leur restitution cartographique, suit une démarche propre tout en gagnant progressivement en cohérence sur différents plans, thématique, géographique, informatique et, encore sur la qualité de l'information.

5.3.1 Cohérence thématique

Un travail de mise en commun des thèmes couverts par les données des différentes filières est effectué pour répondre à la nomenclature unique et définitive dont sera dotée la cartographie finale de l'herbier.

Cette tâche consiste à homogénéiser les informations de base fournies par les photographies aériennes et le sonar latéral en terme de présence (/absence) d'herbier, dans ses limites supérieure et inférieure.

A noter que les autres thèmes (paramètres recouvrement, densité et dynamique de l'herbier) sont une information dérivée des informations de base.

A noter encore que les reconnaissances opérées fournissent une information allant au-delà de la thématique de l'herbier, en abordant notamment celle du substrat, voire d'éléments anthropisés (traces de chalutage, récifs artificiels, épaves, etc.). La mise en cohérence thématique focalisée sur celle de l'herbier a pour effet de masquer ces informations qui demeurent toutefois disponibles au niveau des données de base.

5.3.2 Cohérence géographique

La cohérence géographique veut que toutes les données numériques soient géoréférencées en les calant par rapport à un système de référence unique. Cette mise au point permet ainsi de les croiser ou de les mixer en toute rigueur géographique grâce à leur positionnement réalisé dans un système identique. En l'occurrence, le système recommandé est le système cartographique de l'IGN (système géodésique de la Nouvelle Triangulation de la France « NTF », ellipsoïde de Clarke 1880) avec comme système de projection le Lambert II étendu.

5.3.3 Cohérence informatique

La cohérence informatique qui prévaut dans ce type de démarche impose le recours à des données de nature numérique. La transformation des données de base (cartes sur support papier) en données numériques doit être effectuée le plus tôt possible dans chaque filière pour en faciliter leur exploitation et évolution sous forme d'information géographique.

Cela signifie qu'elles ont d'abord été numérisées au scanner, si elles ne l'étaient pas d'origine, puis calées géographiquement dans le référentiel commun adopté. Les données numériques scannées étant en mode raster, elles doivent à leur tour être transformées en mode vecteur, soit par digitalisation à l'écran, soit par polygonisation automatique, par exemple, au moyen des modules « Polygeom » et « Image Analysis » du logiciel Arcview®.

En bout de filière, les données ainsi mises en forme et en cohérence, sont aptes à être intégrées sous SIG (par exemple Arcview® d'ESRI), de façon à constituer les couches d'information requises relevant de la thématique herbier.

5.3.4 Cohérence de qualité de l'information

Il est nécessaire d'intégrer, dans la création d'une méthodologie de cartographie, une réflexion sur la qualité de l'information cartographique. Pour une utilisation adaptée des données et une gestion optimale du milieu, un degré de fiabilité doit être associé à la carte considérée. Pasqualini (1997) a mis au point une échelle d'évaluation standardisée pour les cartographies réalisées à l'aide de photographies aériennes et de sonogrammes.

Les facteurs influençant la qualité d'une cartographie issue de l'interprétation de photographies aériennes sont : la complexité du site étudié (en terme de topographie, de bathymétrie et de turbidité), les conditions techniques et météorologiques de prises de vues, le choix de la taille du pixel lors de la numérisation des photographies aériennes, la qualité de la correction géométrique et la réalisation de plongées sur le terrain. L'application de cet indice à une cartographie réalisée par l'interprétation de photographies aériennes en suivant la méthodologie mise au point dans ce guide, lui attribue une qualité de 24/33.

Les facteurs influençant la qualité d'une cartographie issue de l'interprétation des données de sonar à balayage latéral sont : la complexité du site étudié, les conditions techniques (comme les corrections de variations d'altitude du poisson, mouvements parasites du poisson liés aux courants *etc.*), la précision du positionnement des sonogrammes, le recouvrement des profils sonar, la réalisation de plongées sur le terrain et éventuellement le traitement d'image effectué sur les sonogrammes avant interprétation. L'application de cet indice à une cartographie réalisée par l'interprétation de sonogrammes d'après la méthodologie mise au point dans ce guide, lui attribue une qualité de 17/24.

L'amélioration de la qualité des informations fournies par une carte issue de la méthodologie exposée dans ce guide sera surtout tributaire d'une augmentation de la surface couverte en plongée sur la zone considérée.

5.4 Les outils

Mise en forme : Puces et numéros

Une large panoplie d'outils est à la disposition des spécialistes de la cartographie. Ces outils sont adaptés au processus développé et interviennent tout au long de ce dernier au niveau de chaque filière jusqu'en bout de chaîne au niveau de l'intégration de l'ensemble des données.

Les premiers outils utilisés au niveau des différentes filières sont ceux qui permettent de transformer les données en données numériques (scanners). Ils sont complétés ensuite par ceux qui permettent de traiter les données ou d'aider leur interprétation, de façon automatique (informatique) ou manuelle (à l'écran).

L'outil central dédié à cette opération est le logiciel SIG qui assure en premier lieu la fonction de cartographie (voir encart). Par contre, ce type de logiciel offre généralement d'autres fonctionnalités au travers de nombreux modules dont il peut être doté, dans le but de faciliter le traitement des données. On peut ainsi citer les modules qui aident à constituer les polygones (polygonisation) et de les rendre parfaitement jointifs (topologie)

De l'utilisation d'un système d'information géographique (SIG)

L'utilisation d'un Système d'Information Géographique est indispensable compte tenu des données à intégrer et à traiter pour la réalisation de la cartographie des biocénoses marines.

Un SIG est un « Système informatique permettant à partir de diverses sources, de rassembler et organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement... ». Un tel système permet, en outre, d'assurer la pérennité de la base de connaissances qu'il gère au sein de sa base de données géolocalisées.

L'objectif premier d'un SIG est la cartographie automatique. Il permet d'élaborer des cartes à la demande. Les données étant localisées, il est possible de choisir à tout moment, d'une part les objets que l'on souhaite cartographier, d'autre part l'échelle de représentation ; l'objectif final étant de réaliser des synthèses utiles à la décision.

Un SIG gère, outre des objets géographiques, des données de type attributaires qui leur sont attachés. Ces données, de par leur nature très diverse, apportent autant d'informations complémentaires que possible comme du texte, des tableaux, des photos ou encore des images animées (séquences vidéo).

Mise en forme : Puces et numéros

5.5 Les spécifications

Dès lors que le processus opératoire de cartographie « manipule » des données géoréférencées et de l'information géographique, des règles et des précautions d'emploi doivent être suivies pour veiller au respect des principes, déjà cités, de cohérence et de qualité des produits de sortie. La mise en œuvre d'un tel processus implique donc

l'application de spécifications particulières à la réalisation de ce type de travail cartographique. Ces spécifications portent tout autant sur les données que sur les outils et instruments utilisés et sont applicables à toutes les filières et à l'ensemble du processus.

Les spécifications ainsi décrites relèvent des questions de géoréférencement, de l'organisation de la base de données, de la création d'information géographique, de la production cartographique et enfin les outils.

En outre, pour l'utilisateur du guide, il importera de suivre la chronologie qui régit le déroulement du processus au travers des étapes qui le structurent.

Mise en forme : Pucés et numéros

5.5.1 positionnement et référentiel géographiques

Le positionnement est un élément essentiel lors de l'acquisition des données car il conditionne directement la qualité de l'information qui sera cartographiée. En effet, il contribue à lui donner la meilleure précision géographique possible. Pour ce faire, l'instrument de type « GPS » (Global Positioning System) est de plus en plus couramment utilisé (cf. encart).

Description du système GPS

Principe de fonctionnement

Il s'agit d'un système composé de satellites, mis en place par le département US, permettant d'acquérir en temps réel, à la fois la position, vitesse de déplacement et temps de référence précis, partout sur et aux environs immédiats de la terre. La constellation satellitaire constituée de 26 satellites est répartie sur 6 orbites différentes pour optimiser la couverture de l'ensemble de la surface terrestre.

Chacun des 26 satellites radio diffuse un signal constitué de deux codes pseudo-aléatoires qui permettent de calculer instantanément la distance séparant le satellite du navigateur GPS. Le récepteur se trouve donc à l'intersection des différentes sphères ayant pour centre chacun des satellites « en vue » et pour rayon les distances calculées, ce qui peut être assimilé à un relèvement spatial.

Toutefois afin de permettre la synchronisation correcte de l'horloge interne du récepteur avec le temps de référence GPS, l'usage simultané de 4 satellites est nécessaire pour un positionnement tridimensionnel. Avec moins de 3 satellites, tout positionnement devient impossible.

Conditions d'accès à un D-GPS : le CRIGE a prévu la possibilité pour des utilisateurs régionaux d'information géographique d'accéder à un système de positionnement précis en bénéficiant de données corrigées (voir procédure CRIGE).

Les coordonnées :

Le système GPS permet donc de se positionner sur la terre en fournissant à l'utilisateur des coordonnées. Celles-ci peuvent être de deux types :

- Soit les coordonnées géographiques (mieux connues en tant que longitude et latitude) qui sont intimement liées au datum géodésique.
- Soit les coordonnées planes ou rectangulaires qui sont indissociables des systèmes de projection plane.

Ce système qui consiste en une antenne et un récepteur-enregistreur se présente sous forme compacte et portable. Il peut donc être installé sur un bateau ou transporté manuellement pour effectuer des relevés en tout point de la côte (Fig. 18).

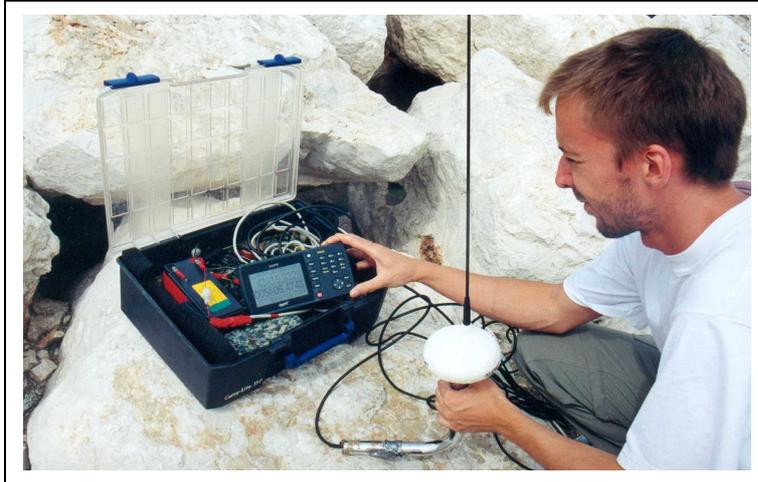


Figure 18. vue du système de positionnement portatif MLR 412 du laboratoire côtier Ifremer de Toulon (D-GPS de type marin embarqué), photo J. Denis

D-GPS côtier

Le D-GPS couramment utilisé par les opérateurs côtiers (embarqués) est un récepteur de radio positionnement utilisant les signaux de la constellation NAVSTAR GPS et les signaux D-GPS des radiophares.

Ce dispositif offre à la fois haute précision, couverture en continu et disponibilité mondiale.

Attention : dans certains secteurs côtiers, la correction différentielle ne peut pas atteindre le récepteur (manque de puissance ou présence d'obstacles naturels selon la configuration de la côte).

Toutes les données ainsi relevées à l'occasion notamment de vérités terrain, sont géoréférencées et acquises en longitude-latitude dans le système géodésique WGS84. De ce fait, les données acquises, quelque soit leur filière de provenance, sont repérées dans le référentiel géographique choisi dont les caractéristiques sont rigoureusement définies en termes de système géodésique, d'ellipsoïde de référence associée et, enfin de système de représentation ou de projection (cf. encart). Toutefois, les conversions d'un système à un autre sont permises grâce à des logiciels dédiés à cette tâche, comme le logiciel CIRCE de l'IGN qui est libre d'accès sur INTERNET.

Remarque : Ifremer, pour ses propres besoins, a développé ce type de logiciel convertisseur pour être directement compatible à l'environnement d'Arcview® (en tant qu'extension).

Pour ce qui concerne la cartographie de l'herbier de Posidonie, et au vu de la situation géographique du littoral PACA, les caractéristiques suivantes sont proposées :

- système géodésique NTF,
- ellipsoïde de Clarke 1880,
- le système de projection en Lambert II étendu,
- coordonnées X et Y en mètres.

Remarque sur le choix de système de projection en Lambert II étendu : il a été choisi pour favoriser les échanges avec d'autres SIG disposant de fichiers sources dans ce système. Cependant, pour des applicatifs strictement développés en région PACA et, de surcroît, à des échelles inférieures au 1/25 000^{ème}, le système idéal à adopter serait en Lambert III (Lambert « zone »).

Du positionnement spatial aux référentiels géographiques

Le positionnement des points dans l'espace et le temps au voisinage de la terre nécessite la définition d'un système géodésique de référence. Par exemple, pour un ensemble de points réalisé par géodésie terrestre (triangulation), on fixe un ellipsoïde, un point fondamental et on réalise une campagne d'observations d'angles, de distances et d'azimuts. L'ellipsoïde de révolution est un modèle mathématique obtenu par le calcul et défini pour qu'il soit le plus près possible du géoïde terrestre.

De nombreux systèmes coexistent et se distinguent entre les systèmes locaux et spatiaux. En France, les systèmes suivants peuvent être utilisés :

Système géodésique	Ellipsoïde de référence associée	Système de projection
Nouvelle Triangulation de la France (NTF) :	Clarke 1880 IGN	Représentation plane Lambert zone I, II, III et IV
Le « World Geodetic System 1984 (WGS 84) : système spatial mondial	IAG-GRS80	Représentation plane UTM (US)
L' «European Datum 1950 (ED50) : système local européen	Hayford 1909	Représentation plane UTM (US) Mercator (SHOM)

Les coordonnées des points géolocalisés peuvent être exprimées soit :

- sous la forme de coordonnées cartésiennes géocentriques (X, Y, Z),
- sous la forme de coordonnées géographiques (angles et hauteur ellipsoïdale),
- sous la forme de coordonnées planes (distances).

Les degrés décimaux : les normes d'écriture des latitudes et longitudes sont nombreuses. Les logiciels SIG ne peuvent lire que les données exprimées en degrés décimaux, contrairement aux écritures classiques des cartes marines en degrés, minutes décimales ou minutes et secondes. Pour atteindre des précisions métriques, il faut alors aller jusqu'au dixième de seconde.

La représentation plane, dite en projection, permet de représenter sur une surface plane une partie d'un modèle ellipsoïdal de la terre, d'obtenir des valeurs métriques plus exploitables que l'unité angulaire et, enfin, de rendre plus facile une évaluation des distances.

Selon les cas, la projection est soit cylindrique (UTM, par exemple) ou conique (Lambert, par exemple). La navigation a beaucoup évolué avec l'usage du GPS qui fournit une position absolue dans un système géodésique donné. La notion de « changement de système » prend alors toute son importance pour ne pas obtenir des résultats grossièrement erronés, le décalage pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres. Des formules, et des logiciels pour les appliquer, existent pour procéder dans des conditions rigoureuses à ces conversions.

Cet unique référentiel géographique recommandé est à utiliser tout au long de la démarche pour assurer une compatibilité parfaite entre toutes les données géoréférencées et l'information géographique qui en découlera.

Parmi les objets essentiels constitutifs du référentiel géographique, le trait de côte fait figure d'élément clé car sa qualité est vitale pour l'ensemble du projet de cartographie (cf. encart).

Un élément du référentiel géographique : le trait de côte

Le trait de côte constitue un objet géographique très bien adapté pour géoréférencer les diverses informations issues de chaque filière, mais encore faut-il que sa précision soit satisfaisante.

Les fichiers source existants disposent d'un trait de côte, comme la BD Carto de l'IGN au 1/50 000^{ème}. D'autres traits de côte peuvent être extraits par numérisation, par exemple à partir des cartes marines du SHOM (cas du trait de côte « Ifremer » réalisé au 1/25 000^{ème}) ou encore de photographies aériennes.

Cependant, il convient systématiquement d'en vérifier la qualité en utilisant une méthode est relativement simple : il suffit de choisir un certain nombre de points sur le terrain, facilement repérables et stables (cap, épis, digue, etc.), et d'en relever les coordonnées au GPS. Les données géoréférencées obtenues sont intégrées au SIG afin de les comparer au trait de côte existant et d'en mesurer le niveau de finesse, à l'échelle requise. Il est recommandé, pour cette opération, d'utiliser un GPS de qualité, de type D-GPS, pour obtenir une précision de 1 à 5 m.

Si cette méthode s'avère peu satisfaisante, il convient d'en réaliser un nouveau. Il s'agit, dans ce cas, de vectoriser un trait de côte à partir d'orthophotos (IGN®) qui allient la précision géométrique des cartes à la richesse de la photographie. Il est recommandé de vectoriser le trait de côte manuellement et à une échelle suffisamment fine, 1/10 000^{ème}, qui autorise les zooms.

5.5.2 organisation de la base de données

Le développement d'un SIG dédié à la cartographie thématique de l'herbier recourt à une forte masse de données, très variées. Il devient vite nécessaire de les structurer dans une base de données performante. Aussi, la conception d'une telle base de données, aussi bien géographiques qu'attributaire, relève de plusieurs principes de base à respecter :

- le premier vise à éviter toute redondance dans les multiples fichiers auxquels l'application fait appel, pour éviter un développement inutile et conséquent de la base. Pour ce faire, il est préconisé de distinguer les données successivement par (i) leur type de représentation et projection (degrés décimaux, degrés décimaux Europe 50, Lambert II (e), III et IV, Mercator, etc.), (ii) les thèmes représentés et (iii) les formats sous lesquelles elles sont disponibles (dxf, arcinfo, mif, raster, shapes). La figure 19 illustre ce type de structuration de la base de données,
- le second recommande de distinguer l'origine des données selon que ce sont (i) des données « sources » (issues de fichiers de référence de type IGN, SHOM, etc.), (ii) des données de « création » qui sont spécifiquement élaborées pour la cartographie de l'herbier et (iii) de données « temporaires » qui s'inscrivent seulement dans la période de développement d'un projet.

Toutes les données, quelque soit leur « statut » décrit plus haut, sont organisées selon la même arborescence. Ces principes appellent les remarques suivantes :

- l'extraction d'une données source sur une zone quelconque est une donnée transformée qui devient une donnée de création,
- une donnée source est une donnée de référence qui ne doit jamais être modifiée. Pour ce faire, toute exploitation se fait obligatoirement sur une copie. Pour éviter toute erreur, il peut être proposé de travailler sur deux disques durs distincts, dont l'un servira de sauvegarde permanente,
- à l'inverse, une donnée de création qui vient à être validée par application d'une procédure d'assurance qualité, peut devenir une donnée source et être considérée à son tour comme une donnée de référence.

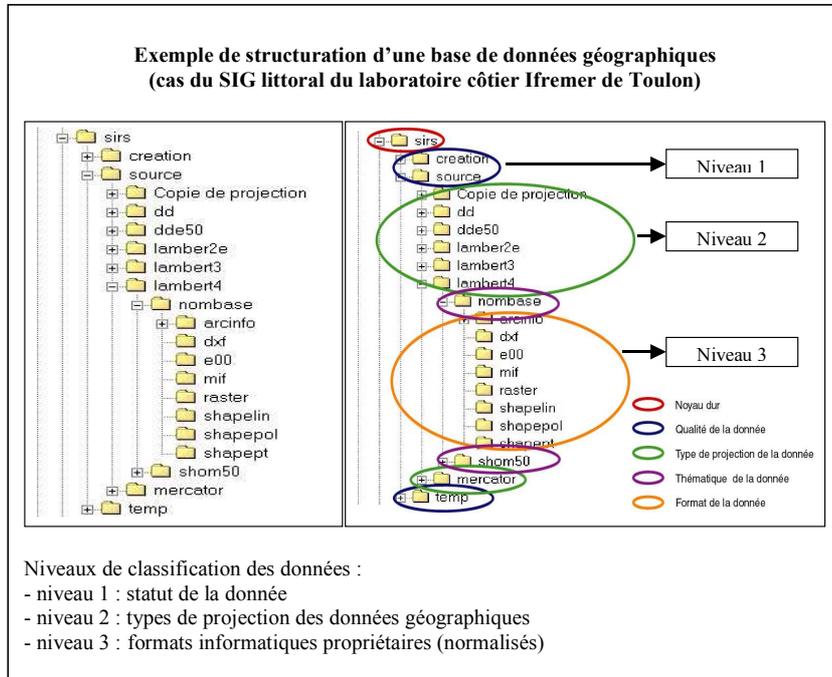


Figure 19. Arborescence illustrant la structuration de la base de données du SIG littoral Ifremer de Toulon

Mise en forme : Pucet et numéros

5.5.3 création d'information géographique

L'information géographique est de nature numérique. Son format informatique doit permettre toute exploitation sous SIG. Plusieurs types de SIG existent sur le marché¹⁴ et se partagent les préférences des utilisateurs en fonction de leurs besoins et budgets. Dans le cadre de la présente démarche, il est proposé de fournir l'information géographique sous un format unique compatible à une exploitation sous les logiciels SIG les plus couramment utilisés (ArcView®, Mapinfo®, etc.). Des données complémentaires viennent accompagner et compléter l'information géographique développée sous le thème de l'herbier. Ces données sont gérées dans des tables attributaires. Une partie des champs à renseigner décrivent les données proprement dites sous forme de métadonnées, tandis qu'une autre partie les décrit au plan thématique.

¹⁴ Arcinfo et Arcview d'ESRI, Mapinfo d'ADDE, Geoconcept, Geomédia d'Intergraph, etc.

Les champs obligatoires des métadonnées sont :

- identifiant (n° de référence de l'objet géographique),
- nature géométrique (polygone, ligne, point),
- source de données (organisme producteur),
- date d'acquisition (date de première création),
- date de mise à jour (date d'une intervention quelconque ayant contribué à modifier la donnée d'origine),
- type de donnée (filière de provenance),
- échelle de saisie (échelle du document d'origine),
- projection cartographique (système utilisé Lambert, Mercator, etc.),
- coordonnées sphériques (angulaires), planes (métriques),
- précision géographique (si connue et prise au GPS).

Quant aux champs thématiques, ils correspondent aux thèmes retenus dans la nomenclature. L'intégration des champs thématiques dans les tables permettent de procéder à toute requête orientée vers la production de cartes répondant à des besoins particuliers.

Remarque importante : la conservation de ces données attributaires répond au même principe qu'énoncé précédemment et qui conseille de les exploiter sur une copie de la version originale sauvegardée sur un espace disque séparé.

Mise en forme : Pucés et numéros

5.5.4 production cartographique

La conception d'une carte répond à plusieurs spécifications qui vont en définir ses caractéristiques. On distingue :

- le format d'édition : il est d'usage courant d'utiliser le format A3 qui allie avantageusement à la fois précision et clarté de l'information avec le côté pratique de consultation (type atlas),
- l'échelle de restitution : l'échelle régionale du 1/25 000^{ème} est une échelle qualifiée de moyenne qui reste compatible avec les tailles, petites (anse, plage, etc.) ou grandes (secteur d'une commune, d'un département voir davantage), des zones d'herbier à cartographier. Cette échelle a une incidence directe sur la qualité (en terme de précision) de l'information restituée. En effet, elle implique une certaine généralisation de l'information de base (plus détaillée) ainsi qu'un certain « lissage » des erreurs géographiques relatives au positionnement et aux extrapolations thématiques effectuées,
- le dallage : compte tenu des paramètres précédents et en fonction de leur taille ou forme, les zones à cartographier peuvent parfois gagner à être découpées selon un dallage optimal. En outre, les dalles ainsi constituées doivent se recouvrir partiellement pour assurer la continuité de lecture de l'information. Aux limites des différentes feuilles, les correspondances avec les feuilles adjacentes peuvent être indiquées (par exemple, par leur numéro d'identification),

- la nomenclature : les paramètres retenus pour être cartographiés correspondent aux attentes des commanditaires. Ces paramètres se veulent être suffisamment représentatifs de l'herbier de posidonie. A cet effet, ils autorisent une reproductibilité de ce type de cartographie à d'autres zones du littoral PACA,
- les cartes et la charte graphique : compte tenu des paramètres retenus et de leurs types de représentation, deux types de cartes sont produites afin d'optimiser leur lisibilité. l'une descriptive et l'autre de synthèse. Une charte graphique simple, adaptée à la thématique herbier a été adoptée pour assurer une lisibilité optimale. Les types de représentations suivants sont préconisés (Tab. XIII) :

Tableau XIII. Types de représentation de l'information thématique de l'herbier

Thèmes de la nomenclature	Types d'information et de représentation	Codes couleur
Information descriptive		
Présence d'herbier	Zones, représentation de type surfacique, entre les limites supérieure et inférieure de l'herbier	Vert
Présence de matte morte	Zones, représentation de type surfacique	Marron
Zones non renseignées	zones complémentaires aux précédentes (milieu entièrement marin), représentation de type surfacique tranches bathymétriques, représentation linéaire	Bleu clair Gamme de bleu
Information de synthèse		
Recouvrement : 3 classes - 0-25% - 25% - 75% - 75%-100%	Zones de recouvrement homogène, 3 classes de recouvrement, représentation de type surfacique	3 couleurs dans la gamme de vert ; clair à foncé
Densité : 2 classes - normale - anormale	Zones de densités normales et zones de densités anormales, représentation de type surfacique par deux types de trame de points à superposer aux zones de recouvrement	Noir Rouge
Dynamique : 3 situations - stabilité ou progression - régression - disparition	Situations représentées ponctuellement selon trois symboles : flèche ascendante flèche descendante croix	Bleu Rouge Rouge

5.5.5 logiciels et matériels informatiques

Mise en forme : Pucés et numéros

Une opération de cartographie nécessite une configuration informatique minimale, composée d'équipements hardware et software dont les fonctionnalités et les capacités sont à la hauteur des tâches à accomplir.

Du point de vue des ordinateurs, il importe de disposer de machines à capacité de calcul et de mémoire vive suffisamment dimensionnées. Côté logiciels, le marché des SIG offre plusieurs types et gammes de produits dont la progression technologique dans les versions est très rapide.

Dans ce contexte très évolutif, il est très difficile de définir des spécifications précises. Aussi, uniquement à titre indicatif, les caractéristiques de la configuration utilisée pour la cartographie de l'herbier des sites ateliers est donnée dans l'encart qui suit.

Exemple de configuration

PC :

- Type Intel Pentium 3, de forte capacité de calcul et mémoire vive à savoir au minimum 450 Mhz avec 128 Mo RAM (650 Mhz avec 256 Mo RAM sont cependant recommandés pour la dernière version d'Arcview 8.1)
- Windows NT ou Windows 2000
- Ecran de 19 à 21 pouces

Logiciels :

- SIG : Arcview® dans ses versions 3.2 et 3.3 qui utilisent encore le langage « Avenue » et sinon, 8.1, la plus récente, qui fait appel au langage « Visual basic », plus universellement utilisé
- Traitement d'images (photographies aériennes : Image Analysis et polygeom (modules d'Arcview®), etc.
- Edition : Corel Draw® , Adobe Illustrator®, etc.

Périphériques :

- Imprimante couleur, format A3, de type Postscript (PS) car plus performante dans la gestion des fichiers à imprimer
- Scanner A4 ou A3
- Graveur de CD-Rom pour sauvegarder et stocker les données sous forme de base
- Port de communication de type « USB » pour faciliter les connections des différents équipements
- Système de compression « ZIP » pour faciliter les échanges de gros fichiers

Mise en forme : Pucés et numéros

6 Statuts des données

Quel statut ont les différentes données utilisées au long du processus de cartographie de l'herbier ?

La conduite d'une étude de zone destinée à cartographier l'herbier implique la manipulation de données de statuts divers qui posent autant de questions en terme de droit d'usage. En effet, de telles études font appel à des données existantes pour en créer de nouvelles.

6.1 Données existantes

Bibliographie : en général, les résultats d'études qui sont consultables à l'issue de recherches bibliographiques sont publiés et relèvent du domaine public. Les données extraites des documents recueillis sont donc libres de droit sans pour autant omettre d'en mentionner la source ou l'origine. Dans certains cas particuliers, lorsqu'une étude est réalisée dans un cadre contractuel précis, une demande d'autorisation d'utiliser les résultats peut être exigée auprès de son financeur ou détenteur officiel (maître d'ouvrage).

Données sources : ces données se trouvent dans les fichiers des organismes nationaux producteurs comme l'IGN, le SHOM, l'IFEN ou les DIREN. Elles sont utilisées en général pour la constitution des référentiels géographiques, tant du côté terre que du côté mer. A cet effet, on distingue :

- **Couverture terrestre** : ces données de l'IGN qui proviennent de la BD Carto constituent le support cartographique de la bande terrestre de la zone côtière. Elle offre notamment une information géographique sur les communes littorales et la typologie associée ainsi que les principaux éléments du réseau hydrographique. Ces données sont à présent incluses dans la plate-forme d'animation régionale ouverte aux utilisateurs publics de PACA. Ces données sont disponibles suite à la concession des droits d'utilisation des bases de données, inscrite au Contrat de Plan Etat-Région. Le protocole stipule que chaque contractant (Etat, Région et Départements) ouvre les droits d'accès aux données à une liste de licenciés associés. L'accessibilité des données est soumise à la signature d'une convention financière particulière entre chaque contractant et l'IGN. Un dispositif de diffusion en ligne validé par l'Etat, la Région et l'IGN est en cours de développement qui viendra s'implanter sur le site existant. Ce dispositif est opérationnel depuis 2002. Toute information sur le protocole et les types de données accessibles peut être trouvée sur le site CRIGE : <http://www.crige-paca.fr>.

- **Bathymétrie** : ces données sont détenues traditionnellement par le SHOM sous forme de sondes, notamment, à des fins d'élaboration des cartes marines. Cependant, ces données de base ne sont pas disponibles sous une forme adéquate adaptée à une exploitation directe sous SIG. Des traitements spécifiques sont par conséquent nécessaires. C'est ce qu'a réalisé l'Ifremer pour ses propres besoins (lignes et surfaces bathymétriques au 1/50 000^{ème} pour le proche côtier et 1/150 000^{ème} jusqu'à la limite du plateau continental). Ces données sources ne sont donc pas diffusables, sans l'accord du SHOM.
- **Trait de côte** : cet objet géographique fait partie intégrante du référentiel géographique. Il existe sous différentes formes, l'une provenant de la BD Carto, l'autre de la BD Ortho. De la BD Carto, bien qu'il souffre d'un manque de précision du fait de son échelle « moyenne » au 1/50 000^{ème}, il est disponible au titre de son appartenance à la plate-forme régionale. De la BD Ortho, il n'existe pas en tant que tel et doit être extrait des orthophotos (disponibles également sur la plate-forme régionale) par digitalisation numérique à l'écran. Une fois élaboré, ce nouveau produit est la propriété à la fois des partenaires financeurs et de l'opérateur.

6.2 Données produites

Données de base : la cartographie de l'herbier nécessite l'acquisition de nouvelles données, spécifiques aux divers moyens employés. Les statuts de ces diverses données produites sont :

Pour le sonar latéral : les données de sonar latéral ont été produites à l'occasion de la campagne POSICART 2000 sur financement de l'Agence de l'eau RMC, du Conseil Régional et de la DIREN PACA avec la contribution financière de l'Ifremer et du COM. Elles sont leur propriété ainsi que du GIS-Posidonie, en tant que partenaire opérateur associé. L'exploitation de ces données dans le cadre de toute nouvelle action de cartographie doit faire l'objet d'une demande d'autorisation de la part de la collectivité territoriale qui la porte auprès du détenteur des données brutes qu'est l'Ifremer. La mise à disposition de ces données sera effectuée à prix coûtant (temps passé), correspondant à une opération de traitement destinée à les qualifier.

Pour les photographies aériennes : une campagne d'acquisition de photographies aériennes est réalisée systématiquement pour chaque opération de cartographie de l'herbier. Ces données sont la propriété des partenaires financeurs de l'opération en question (Agence de l'Eau RMC, Région PACA et DIREN PACA) et des opérateurs et partenaires associés engagés, en l'occurrence, l'Ifremer, le GIS-Posidonie et le COM.

Pour les plongées : ces données sont acquises par les plongeurs spécialistes en biologie. Elles sont la propriété des partenaires financeurs et des intervenants (et associés par convention)



Données élaborées : elles portent essentiellement sur la thématique de l'herbier.

Thématiques herbier : elles consistent en données dérivées des précédentes et, à ce titre, adoptent le même statut de propriété et d'usage, à savoir qu'elles sont la propriété des partenaires financeurs et des opérateurs.

Nota : la perspective de développer une base de données régionale sur la thématique de l'herbier, impliquera l'instauration de règles plus générales de diffusion des données de base et des données élaborées.

7 Éléments d'un cahier des charges et de coût pour la cartographie de l'herbier de Posidonie

Quels éléments réunir pour constituer le cahier des charges d'une cartographie d'herbier et quels en sont les éléments de coût ?

7.1 Éléments d'un cahier des charges

Toute action de cartographie engage des équipements spécialisés et des compétences humaines spécifiques de nature très variée dont les coûts unitaires sont connus mais variables. Au travers de la démarche décrite dans ce guide, les différentes tâches à réaliser ont été listées et représentent, en tant que telles, autant d'éléments à prendre en compte pour l'élaboration du cahier des charges nécessaire au dimensionnement et au chiffrage d'un projet de cartographie de l'herbier de posidonie.

Dans ce qui suit, sont avancés les éléments techniques, chiffrables, qui interviennent dans ces projets en application du processus de cartographie décrit dans ce guide. Ces éléments relèvent de trois grands postes consacrés à (i) l'acquisition des données, (ii) leur traitement puis (iii) leur mise en forme cartographique. Pour chacun d'eux, la qualification des personnels requis est précisée.

7.1.1 Acquisition des données

L'acquisition des données fait appel à des personnels spécialisés en biologie marine et des techniciens formés à la mise en œuvre de moyens spécifiques adaptés à l'intervention sous-marine.

7.1.1.1 bibliographie

- recherche et collecte d'une sélection de références bibliographiques (temps personnel en jours)

7.1.1.2 sonar latéral

- surface de la zone d'étude à couvrir (km² ou Ha)
- durée des levés (en jours d'une durée minimale de 6 heures à une durée maximale de 24/24 heures)
- mise à disposition du sonar, transport et assurance compris (coût journalier de location)

- mise en œuvre du sonar par 1 ou 2 techniciens spécialisés sonaristes, selon la durée journalière de levés (temps personnel en jours)
- consommables (papier support sonogrammes)

7.1.1.3 photographie aérienne

- surface à couvrir de long du linéaire côtier bordant la zone d'étude (km² ou Ha)
- nombre de clichés selon la surface du cliché en fonction de l'échelle choisie (coût par cliché)
- campagne de prises de vues et fournitures des photographies (forfait par campagne auprès de compagnies privées)

7.1.1.4 plongée

- nombre de transects ou de stations (en mètres linéaires et en nombre de points)
- durée des plongées (200 à 400 m. par jour pour des profondeurs maximum de 40 mètres)
- 2 plongeurs biologistes (temps personnel en jours)
- 1 plongeur sécurité de surface (coût journalier)
- 1 chef de mission et pilote de l'embarcation (temps personnel en jours)

7.1.2 Traitement des données

Le traitement des données fait appel à des thématiciens spécialisés dans les différents domaines abordés, qu'il s'agisse du domaine de la géomorphologie, biologie et écologie marines que du domaine de la géomatique, de la géostatistique, du traitement d'images et de la gestion de bases de données.

7.1.2.1 analyse bibliographique

- étude et analyse de l'information pertinente, qualification des données géographiques contenues dans les références sélectionnées (temps personnel en jours)

7.1.2.2 sonar latéral

- dépouillement et interprétation des sonogrammes (temps personnel de spécialiste en jours)
- identification des sites de calibration ou validation et établissement d'une maquette de carte de l'herbier (temps personnel de spécialiste en jours)

7.1.2.3 photographies aériennes

- dépouillement et interprétation des clichés sur logiciel de traitement d'images (temps personnel de spécialiste en jours)
- mosaïcage des photographies interprétées et établissement d'une maquette de carte de l'herbier superficiel (temps personnel de spécialiste en jours)

7.1.2.4 plongée

- dépouillement et interprétation des observations et mesures in situ (temps personnel de spécialiste en jours)
- report sur carte de l'information géographique issue des résultats (temps personnel de spécialiste en jours)

7.1.3 Cartographie

La cartographie fait appel, avec l'appui de thématiciens, à des spécialistes en informatique, en système d'information géographique et en gestion de bases de données pour :

- mise en forme des données par numérisation et calage géographique (temps personnel d'informaticien spécialiste en jours)
- intégration et mixage des données thématiques géoréférencées (temps personnel d'informaticien spécialiste en jours)
- conception et édition des cartes (temps personnel de thématicien et d'informaticien en jours)
- structuration, sauvegarde et reproduction de la base de données (temps personnel d'informaticien en jours).

7.2 Eléments de coût

Chaque projet de cartographie de l'herbier est, en soi, un cas particulier dont le coût dépend 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.

En conséquence, ci-après sont avancés les éléments techniques, chiffrables, qui interviennent dans ces projets, en application de la méthode de cartographie décrite dans ce guide. Ces éléments relèvent de trois grands postes, consacrés à (i) l'acquisition des données, (ii) leur traitement puis (iii) leur mise en forme cartographique. Pour chacun de ces postes, la qualification des personnels requis est précisée.

Les éléments de chiffrage avancés ici s'inspirent des situations rencontrées sur les deux sites pilotes de St-Cyr sur Mer et de la Côte Bleue dont les caractéristiques sont rappelées à titre de référence :

- Emprises surfaciques des zones d'études : 7.5 km² (soit 750 ha) pour St-Cyr et 25 km² (soit 2 500 ha) pour la Côte Bleue ;
- Emprises de l'herbier : 2.5 km² (soit 250 ha) pour St Cyr et 8 km² (soit 800 ha) pour la Côte Bleue ;

- Caractéristiques globales de l'environnement des sites cartographiés : contexte classique de baie pour St-Cyr, côte rocheuse accore pour la Côte bleue.
- configuration de l'herbier : herbier de plaine sub-horizontale majoritairement pour St-Cyr, herbier de typologie plus complexe (herbier de plaine, de colline, en placage sur roche) pour la Côte Bleue.

Remarque : pour les coûts journaliers de personnel, un taux moyenné sur différents tarifs en vigueur a été utilisé, soit de l'ordre de 600 €. par jour et par personne.

7.2.1 Bibliographie

Le poste principal consiste à rechercher, collecter et choisir les références les plus pertinentes vis à vis de l'information géographique qu'elles contiennent (la bathymétrie, les courants, les biocénoses, les obstacles, etc.). Les cartes sélectionnées sont alors numérisées et calées dans le système de référence géographique retenu. Il est recommandé de qualifier ces références du point de vue de leur qualité selon la méthode présentée dans le guide.

Coûts : ce type de tâche est essentiellement évaluée en temps personnel, qui se situe dans une fourchette de 5 à 15 jours, soit un coût dans une fourchette de 3 000 à 9 000 €.

7.2.2 sonar latéral

Une surface de l'ordre de 1 000 ha par jour peut être couverte. Au plan matériel, la mise à disposition du sonar latéral et ses équipements associés (régie de gestion des données) ainsi que du navire de surface sont comptabilisés. Côté personnel, deux types de spécialistes sont requis, technicien sonariste d'une part, pour la mise en œuvre du sonar latéral et géomorphologue sous-marin d'autre part, pour le dépouillement et l'interprétation des données d'imagerie sonar ainsi que des vérités terrain. Les techniciens sonaristes participent de bout en bout à la campagne de levés. Quant au géomorphologue, sa présence est également vivement souhaitée à bord. Celui-ci produit une maquette de carte interprétée qu'il s'agit ensuite de numériser et de caler dans le système de référence géographique retenu.

Coûts : Pour le premier poste, le coût de la mise à disposition d'un sonar latéral (exemple de l'Edge Tech DF 1000 DCI¹⁵), est de l'ordre de 1 000 € par jour, coût auquel se rajoute la mise à disposition d'un bateau qui peut varier de 3 000 à plus de 6 000€ par jour. En tenant compte du personnel spécialisé embarqué (1 à 2 sonaristes affectés au fonctionnement du système complet) cette configuration donne un montant brut journalier de l'intervention sonar dans une fourchette de 5 000 à 8 000 €.

¹⁵ Géré par GENAVIR, filiale Ifremer en 2001.

La prestation du géomorphologue pour l'interprétation à terre, pour des chantiers de cet ordre de grandeur, nécessite de 4 à 8 jours, ce qui représente une fourchette de prix de 2 500 à 5 000 €.

La mise en forme de la carte issue des données sonar est une tâche de quelques jours (2 à 4), y compris, pour mémoire, la numérisation de la maquette (fréquemment fournie au format A0). le montant de ce poste est de l'ordre de 1 000 à 2 000 €.

Remarque : le sonar latéral est une technique relativement coûteuse dont l'amortissement est proportionnel à la surface couverte. Pour promouvoir l'utilisation des images sonar, une initiative régionale a procédé à l'acquisition de données brutes¹⁶ de façon à être mises à la disposition des utilisateurs et opérateurs régionaux, au prix coûtant de leur qualification, ce qui représente un travail de traitement de quelques journées sur logiciel spécialisé¹⁷, soit un coût de 1 000 à 5 000 €, selon l'ampleur de la zone à traiter.

7.2.3 photographie aérienne

La photographie aérienne met en œuvre un équipement spécialisé formant un tout avec l'avion qui le met en œuvre. L'échelle de restitution des clichés la mieux adaptée à l'étude des biocénoses marines est comprise entre le 1/5 000^e et le 1/10 000^e (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 traitement, et l'interprétation des clichés (vectorisation des contours des différentes biocénoses) fait appel aux services d'un spécialiste en analyse spatiale¹⁸ pour restituer, sous forme de maquette de carte des biocénoses, l'information géographique numérisée. Celle-ci peut ensuite être intégrée au SIG. La durée de traitement des clichés est fonction de leur nombre (surface couverte) et de la complexité des fonds et de l'assemblage herbier/sable/roche/matte, en particulier. La topographie des fonds, la surface couverte par les faibles profondeurs, au dessus de 15 m, peut également influencer le temps de traitement des clichés.

Coûts : les postes à considérer portent sur les coûts des campagnes de levés et de personnel pour le traitement des clichés.

Le coût d'une campagne peut être approché par le coût du km² couvert qui est de l'ordre de 150 € environ ce qui implique qu'une campagne (réalisée dans les conditions optimales décrites plus haut) reviendrait, dans l'absolu, à 60 000 €. On constate que le rendement est très grand et se situe bien au-delà des besoins des sites qui ont nécessité seulement une vingtaine de clichés au total. Toutes proportions gardées, le coût moyen

¹⁶ Campagne POSICART 2000.

¹⁷ Logiciel CARAIBES, Ifremer.

¹⁸ Sur logiciels Multiscope® ou Image Analysis d'ArcView®.

des campagnes aériennes répondant aux besoins pour lesquels le guide est conçu est de l'ordre de 3 000 €. Si l'on considère une fourchette du nombre de clichés de 15 à 25, la fourchette de coûts correspondant se situera entre 2 500 et 4 000 €.

Pour le second poste, consacré au traitement, le rendement moyen permet de traiter un à deux clichés par jour, en moyenne selon la surface concernée et la complexité topographique du site, ce qui représente un coût qui se situe dans une fourchette de 5 000 à 7 000 €.

Remarque : les orthophotos de l'IGN sont mises à la disposition des acteurs régionaux à partir de la plateforme d'échanges constituée à cet effet, au niveau du CRIGE¹⁹. Il faut cependant savoir que ces orthophotos n'ont pas systématiquement la qualité requises (conditions de prises de vues) et, par conséquent, ne sont pas toutes exploitables pour satisfaire l'objectif d'étude des biocénoses marines.

7.2.4 Plongée

L'intervention en mer pour les vérités mer nécessite une équipe de 4 personnes (1 pilote, deux scaphandrier en opération un scaphandrier secours, selon l'arrêté de mars 1990 du code du travail), ainsi qu'une embarcation et la logistique afférente : véhicule, matériel de plongée et matériel de terrain (pour prélèvements éventuels).

Les paramètres à prendre en compte dans l'évaluation des coûts des opérations en plongée sous-marine, sont la surface couverte, les objectifs de la cartographie (simple cartographie ou inventaire de données relatives aux paramètres liés à la vitalité de l'herbier), ainsi que la complexité du site. En effet, le nombre d'interventions en plongée, au titre des vérités-terrains, dépend de la qualité du traitement de l'information disponible en amont, c'est-à-dire les données existantes dans la littérature, les photographies aériennes et les sonogrammes.

Le chiffrage du poste terrain est fonction, du nombre de transects et stations prévues en sachant que la durée des plongées est le facteur limitant de ce type d'interventions : à titre d'exemple, on compte 200 à 400 m linéaire parcourus par jour et par palanquée, pour des profondeurs maximum de 40 mètres. Dans les conditions requises des sites pilotes du guide, les interventions nécessitent quelques jours de plongée, de 2 à 6 jours pour l'équipe au complet.

Le dépouillement et l'interprétation des observations réalisées sur le terrain nécessite du temps personnel de spécialistes en biologie marine (connaissance des espèces et des biocénoses marines). Pour des plongées réalisées au titre exclusivement de cartographies, il faut compter 2 à 3 jours de dépouillement et d'interprétation des données, selon la complexité du site, par jour de plongée. Le report sur carte de l'information géographique issue des résultats, peut être réalisée par un spécialiste

¹⁹ Centre régional de l'Information géographique.

thématicien de l'information géographique. En temps personnel, 1 jour de restitution cartographique doit être compté par jour de plongée.

Coûts : Le coût journalier d'une intervention de l'équipe de plongée (4 personnes) dédiée à l'observation des biocénoses est de l'ordre de 2 500 €. Dans le contexte de cartographie auquel répond le guide, le coût de la plongée se situe dans une fourchette de 5 000 à 9 000 € ; pour le traitement des données et leur mise en forme sous SIG, la fourchette de coûts se situe entre 4 000 et 14 000 €.

7.2.5 Cartographie

La cartographie fait appel, avec l'appui de thématiciens, à des spécialistes en informatique, en système d'information géographique et en gestion de bases de données. La principale tâche consiste à intégrer et mixer l'ensemble des informations géographiques provenant des quatre filières de données et de les mettre en cohérence thématique (nomenclature commune), informatique (formats), géométrique (précision) et géographique (référentiel). Elle est complétée par une tâche de conception et d'édition des cartes, suivie, en fin de projet, d'une tâche de structuration, de sauvegarde et de reproduction (sur CD-ROM) de la base de données.

L'évaluation du temps consacré à cette tâche est directement fonction du temps consacré aux tâches précédentes. Il est cependant sujet à variations causées par la rencontre de nombreux impondérables notamment au niveau de l'intégration et mise en cohérence de l'ensemble des informations. Toutefois, il peut être estimé dans l'absolu à ½ homme.mois pour couvrir des surfaces d'ordres kilo. et décakilométrique

Coût : compte tenu des diverses qualifications engagées dans cette tâche, la fourchette de coûts se situe entre 5 000 et 10 000 €.

7.2.6 Coordination et synthèses

Globalement sur de tels projets, la tâche de coordination est indispensable, du simple fait d'assurer la mise en œuvre méthodique et chronologique de l'ensemble des personnels et des moyens. Le temps à consacrer est le plus sujet à variations de la démarche car l'évolution permanente de la situation exige de nombreuses réunions pour informer, échanger tout en y effectuant les réajustements éventuellement nécessaires. De plus, au fur et à mesure du déroulement de ces projets, une tâche de rendu de rapports est exigée jusqu'à la production des documents finaux (rapport de synthèse, notices techniques, atlas). A l'échelle de ces projets (fourchette d'emprises spatiale kilométrique à décakilométrique) cette tâche ne saurait dépasser un investissement temps de l'ordre de 1.5 homme.mois.

Coût : il se situe globalement dans une fourchette comprise entre 20 000 et 30 000 €, ce qui représente globalement de 10 % pour les gros projets, à 30 % pour les petits projets.

7.2.7 Tableau récapitulatif

Postes budgétaires	Fourchettes de coûts
Bibliographie	3 à 9 000 €
Sonar latéral	10 à 20 000 €
Photographie aérienne	2.5 à 4 000 €
Plongée	10 à 23 000 €
Cartographie	5 à 10 000 €
Coordination et synthèses	20 à 30 000 €
Total	50 à 100 000 €

Liste des figures

- Figure 1. Inflorescence (à gauche) et fruits (à droite) de *Posidonia oceanica*. D'après Boudouresque & Meinesz (1982)
- Figure 2. Bloc diagramme d'une matte de *Posidonia oceanica* montrant les rhizomes rampants (à la base : phase de colonisation par la posidonie) devenus verticaux (lutte pour l'espace ou résistance à l'ensablement) mais pouvant redevenir horizontaux (recolonisation d'une intermatte, zone où la posidonie est morte). Cet ensemble très compact, constitué par un lacis dense de rhizomes et par le sédiment qui colmate les interstices, est nommé "matte". D'après Boudouresque & Meinesz (1982)
- Figure 3. Les différents types d'herbier à *Posidonia oceanica*. **1** : Herbier de plaine, vu en coupe ; **i** = intermatte ; **d** = intermatte déferlante. **2** = herbier en pain de sucre, vu en coupe. **3** : Herbier tigré, vu en plan. **4** : Herbier de colline, vu en plan. **5** : Herbier de colline, vu en coupe ; **c** = colline. **6 à 10** : évolution d'une colline, de sa formation à son démantèlement. **v** = *Posidonia oceanica*, pointillés = sable, hachures obliques = matte. D'après Boudouresque *et al.* (1985a)
- Figure 4. La formation d'un récif-frangeant (B), puis d'un récif-barrière de posidonie (C), dans une baie de mode calme, par élévation de la matte. D'après Boudouresque & Meinesz (1982)
- Figure 5. Un herbier de posidonie en pain de sucre. D'après Boudouresque (inédit)
- Figure 6. Modèle simplifié de fonctionnement de l'écosystème à *Posidonia oceanica*. *Jujubinus* et *Rissoa* sont des Gastropodes, *Holothuria* et *Paracentrotus* des Echinodermes, les Hippolytidae, les Processidae, *Idotea* et *Pisa* des Crustacés, *Chromis*, *Conger*, *Labrus*., *Sarpa*, *Scorpaena*, *Spicara* et *Symphodus* des poissons. D'après Boudouresque *et al.* (1994)
- Figure 7. Répartition des investigations pour la connaissance de l'herbier de posidonie en vue de sa cartographie
- Figure 8. Schéma général de la stratégie menant à la cartographie de l'herbier
- Figure 9. Exemple de carte des connaissances bibliographiques de l'herbier de posidonie de la baie de St. Cyr sur Mer (Var)
- Figure 10. Principe de fonctionnement du sonar à balayage latéral
- Figure 11. Mise en œuvre du sonar à balayage latéral
- Figure 12. Maquette de carte de l'herbier élaborée à partir de l'interprétation des données sonar
- Figure 13. Exemple de maquette de carte de l'herbier élaborée à partir de photographies aériennes
- Figure 14. Méthode d'évaluation du recouvrement de l'herbier de Posidonie sur le substrat. Dimensions de la plaquette transparente (en cm) et exemple de notation (3, 5, 7) lors de l'évaluation. Au dessus, un observateur en situation, situé à 3 m au dessus de l'herbier (d'après Gravez *et al.*, 1995)
- Figure 15. Présentation des différents types de limite inférieure de l'herbier de Posidonie (d'après Meinesz & Laurent, 1978, modifié par Boudouresque, redessiné par Palluy, inédit). 1 = limite progressive; 2 = limite franche ; 3 = limite érosive ; 4 = limite régressive
- Figure 16. Schéma de la démarche générale de construction des cartes de l'herbier
- Figure 17. Répartition spatiale (présence) de l'herbier de la baie de St. Cyr sur Mer (Var).
- Figure 18. Vue du système de positionnement portatif MLR 412 du laboratoire côtier Ifremer de Toulon (D-GPS de type marin embarqué), photo J. Denis
- Figure 19. Arborescence illustrant la structuration de la base de données du SIG littoral de l'Ifremer de Toulon

Liste des tableaux

- Tableau I. Récapitulatif des besoins en cartographie des commanditaires.
- Tableau II. Tâches inhérentes aux trois étapes de la démarche de cartographie.
- Tableau III. Attribution de la note (/5) correspondant au paramètre "**échelle de la carte**" de l'indice de fiabilité des cartes anciennes.
- Tableau IV. Attribution de la note (/5) correspondant au paramètre "**mode de positionnement des données**" de l'indice de fiabilité des cartes anciennes (une note à attribuer par tranche bathymétrique 0-5 m, 5-15m et 15-40 m si le mode de positionnement utilisé change avec la profondeur).
- Tableau V. Attribution de la note (/10) correspondant au paramètre "**mode d'acquisition des données**" de l'indice de fiabilité des cartes anciennes (une note à attribuer par tranche bathymétrique 0-5 m, 5-15m et 15-40 m).
- Tableau VI. Correspondance entre l'échelle et la surface couverte de photographies aériennes
- Tableau VII. Correspondances entre les échelles d'origine des photographies aériennes et les échelles de grossissement maximal admissibles.
- Tableau VIII. Classification de l'herbier en fonction de la profondeur (Prof., en mètres). DA = densité anormale, DSI = densité sub-normale inférieure, DN = densité normale (en gras), DSS = densité sub-normale supérieure (d'après Pergent-Martini, 1994 et Pergent *et al.*, 1995).
- Tableau IX. Echelle d'évaluation du déchaussement en fonction des valeurs moyennes mesurées le long du balisage.
- Tableau X. Interprétation de la vitalité de l'herbier (tendance à la progression) en fonction des pourcentages moyens de rhizomes plagiotropes mesurés en limite supérieure d'herbier.
- Tableau XI. Interprétation de la vitalité de l'herbier (tendance à la progression) en fonction des pourcentages de recouvrement moyens mesurés ou estimés le long du balisage en limite supérieure d'herbier.
- Tableau XII. Liste des espèces accompagnatrices de l'herbier où pouvant être rencontrées au voisinage des sites étudiés et paramètres à considérer lors des observations.
- Tableau XIII. Types de représentation de l'information thématique de l'herbier
- Tableau XIV. Codes couleurs et symboles adoptés dans la charte graphique

Références bibliographiques

Supprimé : Conclusion¶

La sélection de références qui suit relève directement du thème de la cartographie des fonds marins côtiers, de l'herbier en particulier et de la normalisation de l'information géographique. Une seconde partie est davantage réservée aux références d'ouvrages traitant des moyens d'investigation.

Cartographie de l'herbier

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

BOUDOURESQUE C.F., BERTRANDY M.C., DESJARDINS C., FIFIS J.C., FORET P., LEFEVRE J.R., MEINESZ A., NIERI M., PATRONE J., PERGENT G., GRAVEZ V., 1987. Mise en place d'un système de surveillance des herbiers à *Posidonia oceanica* le long du littoral méditerranéen français. *Symposium International sur la Protection du Milieu Marin contre les rejets urbains, Ville de Marseille*, Fr. (1) : 1-20.

PAILLARD M., GRAVEZ V., CLABAUT P., WALKER P., BLANC J.J., BOUDOURESQUE C.F., BELSHER T., URSHELER F., POYDENOT F., SINASSAMY 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 et GIS-Posidonie publ., Fr. : 1-36 + 3 cartes annexes.

PASQUALINI V., 1997. Caractérisation des peuplements et types de fonds le long du littoral corse (Méditerranée, France). *Thèse de Doctorat, Univ. de Corse*, 1-180+annexes.

BELSHER T. et HOULGATTE E., 2000, Etude des sédiments superficiels marins des herbiers à Phanérogames et des peuplements à *Caulerpa taxifolia* de Menton au Cap d'Ail, cartes et Atlas, Ifremer publ. : 43 p. et 3 cartes.

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 Posidonie de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, première partie : présentation et guide méthodologique, *Région PACA/Agence de l'Eau RMC/GIS-Posidonie/CQEL 13/CQEL-83, Conseil général 06*, GIS Posidonie publ., Marseille, Fr. : 1-76.

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. *Contrat d'étude pour le Syndicat Intercommunal de l'Aire Toulonnaise, IFREMER et GIS Posidonie*. IFREMER publ., La Seyne, fr. : 1-245 (y compris volume des annexes).

BERNARD G., DENIS J., DENEUX F., BELSHER T., SAUZADE D., BOUDOURESQUE C.F., CHARBONNEL E., EMERY E., HERVE G., BONHOMME P., 2001. Etude et cartographie des biocénoses de la rade de Toulon - Rapport de synthèse final. *Contrat d'étude pour le Syndicat Intercommunal de l'Aire Toulonnaise, IFREMER et GIS Posidonie*. IFREMER publ., La Seyne, fr. : 1-150.

- Mis en forme



BERNARD G., DENIS J., BONHOMME P., CADIOU G., CHARBONNEL E., EMERY E., HERVE G., 2002. 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. Contrat Ville de Hyères-les-Palmiers - GIS Posidonie & IFREMER. GIS Posidonie publ., Marseille Fr. : 1-50 + 3 cartes non num.

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 et Milieu*, 31 (1), 27-34.

MEINESZ A., BOUDOURESQUE C.F., FALCONETTI C., ASTIER J.M., BAY D., BLANC J.J., BOURCIER M., CINELLI F., CIRIK S., CRISTIANI G., GERONIMO I. DI., GIACCONE G., HARMELIN J.G., LAUBIER L., LOVRIC A.Z., MOLINIER R., SOYER J. et VAMVAKAS C., 1983, normalisation des symboles pour la représentation et la cartographie des biocénoses benthiques littorales de Méditerranée, *Annales de l'Institut Océanographique*, tome 59, fascicule 2.

MEINESZ A. et LAURENT R., 1978, cartographie et état de la limite inférieure de l'herbier de *Posidonia oceanica* dans les Alpes maritimes, campagne POSEIDON, *Botanica Marina*, vol. XXI, pp. 513-526.

PASQUALINI V., PERGENT G., FINIDORI S., PERGENT-MARTINI C., 2001, Cartographie des herbiers à *Posidonia oceanica* et leur utilisation en tant qu'indicateur biologique de la qualité du milieu littoral en Corse, Contrat Equipe Ecosystèmes littoraux, Université de Corse & Agence de l'eau RMC, n°99-1404, : 81p.

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

Moyens d'investigation du milieu

AUGRIS Cl., CLABAUT Ph., 2001, Cartographie géologique des fonds marins côtiers, exemples le long du littoral français, *publications Ifremer Bilans et prospectives*, 75 p.

LURTON X., 1998, Acoustique sous-marine, présentation et applications, Ifremer Ingénierie et technologie, *Editions Ifremer*, Plouzané, France, 110 p.

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 Alpes Provence Côte d'Azur, première partie : présentation et guide méthodologique, Région PACA/Agence de l'Eau RMC/GIS-Posidonie/CQEL 13/CQEL 83/Conseil général 06, GIS Posidonie publ., Marseille, Fr. : 1-76.

STEPHAN M., SATRA C., AUGRIS Cl., BOURILLET J. F., 2002, Synthèses géologiques sur le plateau continental français métropolitain, recensement des campagnes côtières et des documents produits, *rapport interne Ifremer*, 49 p.

PASQUALINI V., 1997. Caractérisation des peuplements et types de fonds le long du littoral Corse (Méditerranée, France). Thèse de doctorat de l'Université de Corse : 190 p.



Bibliographie générale sur l'herbier

- ACUNTO S., LYONS A.P., POULIQUEN E., 2000. Some anatomical features of *Posidonia oceanica* leaves and their importance to acoustic scattering. *Biol. mar. Medit.*, 7 (1) : 571-574.
- AGOSTINI S., DESJOBERT J.M., PERGENT G., 1998. Distribution of phenolic compounds in the seagrass *Posidonia oceanica*. *Phytochemistry*, 48 (4) : 611-617.
- AUGIER H., BOUDOURESQUE C.F., 1970. 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., ROBERT P., 1980. Etude du régime thermique annuel des eaux au niveau des peuplements de phanérogames marines de la baie de Port-Cros; *Trav. sci. Parc nation. Port-Cros*, 6 : 69-131.
- BALESTRI E., PIAZZI L., CINELLI F., 1998. Survival and growth of transplanted and natural seedlings of *Posidonia oceanica* (L.) Delile in a damaged coastal area. *J. exp. mar. Biol. Ecol.*, 228 : 209-225.
- BELSHER T., LOUBERSAC L., BELBEOCH G., 1985. Remote sensing and mapping. *Handbook of phycological methods. Ecological field methods : macroalgae*. Littler M.M., Littler D.S. édit., Cambridge Univ. Press publ., U.K. : 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. *Mar. Ecol. P.S.Z.N.*, 9 (2) : 157-165.
- BEN D. van der, 1969. Les épiphytes des feuilles de *Posidonia oceanica* sur les côtes françaises de la Méditerranée. *Proc. internation. Seaweed Symp.*, 6 : 79-84.
- BEN ALAYA H., 1972. Répartition et conditions d'installation de *Posidonia oceanica* Delile et *Cymodocea nodosa* Ascherson dans le golfe de Tunis. *Bull. Inst. Océanogr. Pêches Salammbô*, Tun., 2 (3) : 331-416.
- BIANCHI C.N., PEIRANO A., 1995. Atlante delle Fanerogame marine della Liguria. *Posidonia oceanica e Cymodocea nodosa*. Centro Ricerche Ambiente Marino, ENEA publ., La Spezia, Ital. : 1-146.
- BLANC J.J., JEUDY DE GRISSAC A., 1978. Recherches de géologie sédimentaire sur les herbiers à posidonies du littoral de la Provence. Centre national Explor. Océans publ., Fr. : i-vii + 1-185 + 42 pl. h.t.
- BLANC J.J., JEUDY DE GRISSAC A., 1984. Erosions sous-marines des herbiers à *Posidonia oceanica* (Méditerranée). *International Workshop on Posidonia beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. édit., GIS Posidonie publ., Fr., 1 : 23-28.
- 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.
- BOUDOURESQUE C.F., 1996. Impact de l'homme et conservation du milieu marin en Méditerranée. 2^e édition. GIS Posidonie publ., Fr. : 1-243.
- BOUDOURESQUE C.F., BALLESTEROS E., BEN MAIZ N., BOISSET F., BOULADIER E., CINELLI F., CIRIK S., CORMACI M., JEUDY DE GRISSAC A., LABOREL J., LANFRANCO E.,

- LUNDBERG B., MAYHOUB H., MEINESZ A., PANAYOTIDIS P., SEMROUD R., SINASSAMY J.M., SPAN A., VUIGNIER G., 1990. Livre rouge "Gérard Vuignier" des végétaux, peuplements et paysages marins menacés de Méditerranée. Programme des Nations Unies pour l'Environnement publ., Gr. : 1-250.
- BOUDOURESQUE C.F., CROUZET A., PERGENT G., 1983. Un nouvel outil au service de l'étude des herbiers à *Posidonia oceanica* : la lépidochronologie. *Rapp. P.V. Réun. Commiss. internation. Explor. sci. Médit.*, Monaco, 28 (3) : 111-112.
- BOUDOURESQUE C.F., JEUDY DE GRISSAC A., 1983. L'herbier à *Posidonia oceanica* en Méditerranée : les interactions entre la plante et le sédiment. *J. Rech. océanogr.*, 8 (2-3) : 99-122.
- BOUDOURESQUE C.F., JEUDY DE GRISSAC A., MEINESZ A., 1984. Relations entre la sédimentation et l'allongement des rhizomes orthotropes de *Posidonia oceanica* dans la baie d'Elbu (Corse). *International Workshop on Posidonia oceanica beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. édit., GIS Posidonie publ., Fr., 1 : 185-191.
- 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.*, Monaco, 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., LEDOYER M., VITIELLO P., 1994. Les herbiers à Phanérogames marines. *Les biocénoses marines et littorales de Méditerranée, synthèse, menaces et perspectives*, Bellan-Santini D., Lacaze J.C., Poizat C. édit., Muséum National d'Histoire naturelle publ., Paris : 98-118.
- BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., LEFEVRE J.R., 1985b. Cartographie des peuplements benthiques marins de Corse : I. La formation récifale à *Posidonia oceanica* de Saint-Florent. *Ann. Inst. océanogr.*, N.S., 61 (1) : 27-38.
- BOUDOURESQUE C.F., THOMMERET J., THOMMERET Y., 1980. Sur la découverte d'un bioconcrétionnement fossile intercalé dans l'herbier à *Posidonia oceanica* de la baie de Calvi (Corse). *Journées Etud. Systém. Biogéogr. médit.*, Cagliari, CIESM, Monaco : 139-142.
- BOURCIER M., 1980. Evolution récente des peuplements macrobenthiques entre La Ciotat et les îles des Embiez (côtes de Provence). Processus de contamination du benthos entre bassins voisins. *Téthys*, 9 (3) : 197-206.
- BOURCIER M., 1982. Evolution au cours des quinze dernières années des biocénoses benthiques et de leurs faciès dans une baie méditerranéenne soumise à l'action lointaine de deux émissaires urbains. *Téthys*, 10 (4) : 303-313.
- CALVO S., FRADÀ-ORESTANO C., 1984. L'herbier à *Posidonia oceanica* des côtes siciliennes : les formations récifales du Stagnone. *International Workshop on Posidonia oceanica beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. édit., GIS Posidonie publ., Fr., 1 : 29-37.
- CAYE G., 1980. Analyse du polymorphisme caulinaire chez *Posidonia oceanica* (L.) Del. *Bull. Soc. bot. Fr., Lett. bot.*, 127 (3) : 257-262.

- CAYE G., 1982. Etude sur la croissance de la posidonie, *Posidonia oceanica* (L.) Delile, formation des feuilles et croissance des tiges au cours de l'année. *Téthys*, Fr., 10 (3) : 229-235.
- CAYE G., MEINESZ A., 1984. Observations sur la floraison et la fructification de *Posidonia oceanica* dans la baie de Villefranche et en Corse du Sud. *International Workshop on Posidonia oceanica beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. édit., GIS Posidonie publ., Fr., 1 : 193-201.
- 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). GIS Posidonie publ., Fr. : 1-103.
- CHESSA L.A., FRESI E., 1994. Conservazione e gestione delle praterie di Posidonia. *La gestione degli ambienti costieri e insulari del Mediterraneo*. Monbailliu X., Torre A. édit., Edizione del Sole publ., Ital. : 103-127.
- CUNY P., SERVE L., JUPIN H., BOUDOURESQUE C.F., 1995. Water soluble phenolic compounds of marine phanerogam *Posidonia oceanica* in a Mediterranean area colonised by the introduced Chlorophyte *Caulerpa taxifolia*. *Aquatic Botany*, 52 : 237-242.
- DANCE C., SAVY S., 1987. Predation of *Paracentrotus lividus* by *Marthasterias glacialis* : an *in situ* experiment at Port-Cros (France, Mediterranean). *Posidonia Newsletter*, Fr., 1 (2) : 35-41.
- 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). GIS Posidonie publ., Fr. : 1-48.
- FRANCOUR P., SEMROUD R., 1992. Calculation of the root area index in *Posidonia oceanica* in the western Mediterranean. *Aquatic Botany*, 42 : 281-286.
- GAMBI M.C., GUIDETTI P., 1998. Morphological observations on seedlings of *Posidonia oceanica* (L.) Delile germinated *in situ*. *Biol. mar. mediterr.*, 5 (1) : 549-552.
- GAMBI M.C., LORENTI M., RUSSO G.F., SCIPIONE M.B., ZUPI V., 1992. Depth and seasonal distribution of some groups of the vagile fauna of the *Posidonia oceanica* leaf stratum : structural and trophic analysis. *Marine Ecology PSZN*, 13 (1) : 17-39.
- GIRAUD G., 1977. Recensement des floraisons de *Posidonia oceanica* (Linné) Delile en Méditerranée. *Rapp. P.V. Réun. Commiss. internation. Explor. sci. Médit.*, Monaco, 24 (4) : 126-130.
- HARMELIN-VIVIEN M., 1982. Ichtyofaune des herbiers de posidonies du Parc national de Port-Cros. I. Composition et variations temporelles. *Trav. sci. Parc nation. Port-Cros*, Fr., 8 : 69-92.
- HARMELIN-VIVIEN M., 1984. Ichtyofaune des herbiers de posidonies du Parc naturel régional de Corse. *International Workshop on Posidonia oceanica beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. édit., GIS Posidonie publ., Fr., 1 : 291-301.
- HOAREAU A., 1988. Cartographie des végétaux marins par images SPOT. Presqu'île de Giens. Mémoire DESS Télédétection, Méthodes et Applications, Univ. P. et M. Curie, Paris : 1-28 + Annexes 1-12 + 8 fig. h.t.
- JAUBERT J., CHISHOLM J., DUCROT D., RIPLEY H., KHELIF L., GENDRIER L., 2001. Interactions entre l'algue *Caulerpa taxifolia* et la phanérogame *Posidonia oceanica* dans la baie de Menton : données préliminaires obtenues par imagerie multispectrale aéroportée et photographie aérienne. *Fourth*

international Workshop on Caulerpa taxifolia, Gravez V., Ruitton S., Boudouresque C.F., Le Diréac'h L., Meinesz A., Scabbia G., Verlaque M. édité, GIS Posidonie publ., Fr. : 232-235.

JIMENEZ S., CANO R., BAYLE J., RAMOS A., SANCHEZ LIZASO J.L., 1996. Las praderas de *Posidonia oceanica* (L.) Delile como zona de protección de juveniles de especies de interés comercial. *Real Soc. esp. Hist. nat.*, tomo extraordinario : 375-378.

KHOURY C., 1984. Ethologies alimentaires de quelques espèces de poissons de l'herbier de posidonies du Parc national de Port-Cros. *International Workshop on Posidonia oceanica beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. édité, GIS Posidonie publ., Fr., 1 : 335-347.

LARKUM A.W.D., HARTOG C. van den, 1989. Evolution and biogeography of seagrasses. *Biology of Seagrasses. A treatise on the biology of seagrasses with special reference to the Australian region*. Larkum A.W.D., McComb A.J., Shepherd S.A. édité, Elsevier publ., Amsterdam : 112-156.

LEDOYER M., 1962. Etude de la faune vagile des herbiers superficiels de Zostéracées et de quelques biotopes d'algues littorales. *Rec. Trav. Stat. mar. Endoume*, Fr., 25 (39) : 117-235.

LEPOINT G., NYSSSEN F., GOBERT S., DAUBY P., BOUQUEGNEAU J.M., 2000. Relative impact of a seagrass bed and its adjacent epilithic algal community in consumer diets. *Mar. Biol.*, 136 : 513-518.

LIBES M., BOUDOURESQUE C.F., 1987. Uptake and long-distance transport of carbon in the marine phanerogam *Posidonia oceanica*. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 38 : 177-186.

MAZZELLA L., BUIA M.C., GAMBI M.C., LORENTI M., RUSSO G., SCIPIONE M.B., ZUPI V., 1992. Primary production of *Posidonia oceanica* and the vagile fauna of leaf stratum : a spatio-temporal analysis in a meadow off the island of Ischia (Gulf of Naples, Italy). *Space and time series. Data analysis in coastal benthic Ecology*, Keegan B F. édité, Commission of the European Communities publ. : 519-539.

MAZZELLA L., BUIA M.C., GAMBI M.C., LORENTI M., RUSSO G., SCIPIONE M.B., ZUPI V., 1995. A review of the trophic organization in the *Posidonia oceanica* ecosystem. *La Posidonia oceanica*, Cinelli F., Fresi E., Lorenzi C., Mucedola A. édité, Revista marittima publ., Ital., 12 (suppl.) : 31-47.

MAZZELLA L., GAMBI M.C., RUSSO G.F., BUIA M.C., 1984. Deep flowering and fruiting of *Posidonia oceanica* around the Island of Ischia (Gulf of Naples, Italy). *International Workshop on Posidonia oceanica beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. édité, GIS Posidonie publ., Fr., 1 : 203-209.

MEINESZ A., BELSHER T., BOUDOURESQUE C.F., LEFEVRE J.R., 1991. Première évaluation des potentialités du satellite SPOT pour la cartographie des peuplements benthiques superficiels de Méditerranée occidentale. *Oceanologica Acta*, 14 (3) : 299-307.

MEINESZ A., BIANCONI C.H., JEUDY DE GRISSAC A., 1986a. Transect dans l'herbier de Posidonies de la baie d'Elbu. *Trav. sci. Parc nat. région. Rés. nat. Corse*, 2 : 39-40.

MEINESZ A., BOUDOURESQUE C.F., BIANCONI C.H., 1989. Réserve de Scandola : cartographie des hauts fonds autour du sec d'A Furmicula en baie d'Elbu. *Trav. sci. Parc nat. région. Rés. nat. Corse*, 23 : 11-16.

- 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. région. Rés. nat. Corse*, 13 : 27-37.
- MEINESZ A., BOUDOURESQUE C.F., LEFEVRE J.R., 1988a. A map of the *Posidonia oceanica* beds of Marina d'Elbu (Corsica, Mediterranean). *Mar. Ecol. PSZN*, 9 (3) : 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. région. Rés. nat. Corse*, 57 : 163-169.
- MEINESZ A., CAYE G., CHARBONNEL E., LEFEVRE J.R., 1988b. Localisation de la limite inférieure des herbiers à *Posidonia oceanica* et observations sur sa fructification, dans la réserve naturelle des îles Lavezzi : missions 1986. *Trav. sci. Parc nat. région. Rés. nat. Corse*, 14 : 53-70.
- 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., 1978. Cartographie et état de la limite inférieure de l'herbier de *Posidonia oceanica* dans les Alpes-Maritimes (France) – Campagne Poséidon 1976. *Botanica marina*, 21 (8) : 513-526.
- 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 Golfe Juan et à l'Est des îles de Lérins. *Ann. Inst. océanogr., N.S.*, 58 (1) : 103-111.
- 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). *International Workshop on Posidonia oceanica beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. édit., 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., LEFEVRE J.R., BOUDOURESQUE C.F., 1986b. Cartes de la limite inférieure des herbiers de Posidonies des côtes des Alpes-Maritimes. Direction Départementale de l'Équipement, Service-Maritime –CIPALM, Nice : 1-12 + 3 cartes h.t.
- MEINESZ A., MOLENAAR H., BELLONE E., LOQUES F., 1992. Vegetative reproduction in *Posidonia oceanica*. I. Effects of rhizome length and transplantation season in orthotropic shoots. *Marine Ecology PSZN*, 13 (2) : 163-174.
- 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. *Ann. Inst. océanogr., N.S.*, 59 (1) : 21-35.
- MEINESZ A., VERLAQUE M., 1989. Localisation de la limite inférieure des herbiers de *Posidonia oceanica* (L.) Delile de la réserve naturelle des Lavezzi. II : mission Lavezzi 5. *Trav. sci. Parc nat. région. Rés. nat. Corse*, 24 : 83-88.

- MOLINIER R., PICARD J., 1952. Recherches sur les herbiers de Phanérogames marines du littoral méditerranéen français. *Ann. Inst. océanogr.*, Fr., 27 (3) : 157-234.
- MOLINIER R., PICARD J., 1953. Etudes biologiques sur les herbiers de Phanérogames marines à l'Ouest d'Alger. *Bull. Stat. Aquacult. Pêche Castiglione*, Alg., 4 : 7-34.
- PANAYOTIDIS P., 1980. Contribution à l'étude qualitative et quantitative de l'association *Posidonetum oceanicae* Funk 1927. Thèse Doct. 3^e cycle Océanologie biologique, Univ. Aix-Marseille 2 : i-ix + 1-213.
- PANAYOTIDIS P., BOUDOURESQUE C.F., 1981. Végétation marine de l'île de Port-Cros (Parc National). XXI. Aire minimale et patchiness de la flore épiphyte des feuilles de *Posidonia oceanica*. *Trav. sci. Parc nation. Port-Cros*, Fr., 7 : 71-84.
- PERES J.M., PICARD J., 1964. Nouveau manuel de bionomie benthique de la Mer Méditerranée. *Rec. Trav. Stat. mar. Endoume*, 31 (47) : 3-137.
- PERGENT G., BEN MAIZ N., BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., 1989. The flowering of *Posidonia oceanica* over the past fifty years : a lepidochronological study. *International Workshop on Posidonia beds*, Boudouresque C.F., Meinesz A., Fresi E., Gravez V. édité, GIS Posidonie publ., Fr., 2 : 69-76.
- PERGENT G., BOUDOURESQUE C.F., THELIN I., MARCHADOUR M., PERGENT-MARTINI C., 1991. Map of benthic vegetation and sea-bottom types in the harbour of 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-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*, Fr., 54 : 3-27.
- PERGENT G., RICO-RAIMONDINO V., PERGENT-MARTINI C., 1997. Fate of primary production in *Posidonia oceanica* meadows of the Mediterranean. *Aquatic Botany*, 59 : 307-321.
- PERGENT G., ROMERO J., PERGENT-MARTINI C., MATEO M.A., BOUDOURESQUE C.F., 1994. Primary production, stocks and fluxes in the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 106 : 139-146.
- PERGENT-MARTINI C., PASQUALINI V., 2000. Seagrass population dynamics before and after the setting up of a wastewater treatment plant. *Biol. mar. Médit.*, 7 (2) : 405-408.
- PIAZZI L., ACUNTO S., PAPI I., PARDI G., CINELLI F., 2000. Mappatura delle praterie di Fanerogame marine della Toscana : situazione al 1998. *Biol. mar. Médit.*, 7 (1) : 594-596.
- PICARD J., 1965. Recherches qualitatives sur les biocoenoses marines des substrats meubles dragables de la région marseillaise. Thèse Doct. Sci. nat., Univ. Aix-Marseille, Fr. : 1-160 + 1 carte h.t.
- PIOVETTI L., SERVE L., COMBAUT G., GADEL F., 1984. Analyse des substances phénoliques des restes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile provenant de sédiments holocènes et de dépôts actuels.

- International Workshop on Posidonia oceanica beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. édit., GIS Posidonie publ., Fr., 1 : 137-144.
- RAMOS-ESPLA A.A., 1984. Cartografía de la pradera superficial de *Posidonia oceanica* en la bahía de Alicante. *International Workshop on Posidonia oceanica beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. édit., GIS Posidonie publ., Fr., 1 : 57-61.
- REY J., DIAZ DEL RIO V., 1989. Cartografía de los fondos marinos de la Bahía de Palma (Balears, España) : distribución de las praderas vegetales y sedimentos superficiales. *International workshop on Posidonia beds*, Boudouresque C.F., Meinesz A., Fresi E., Gravez V. édit., GIS Posidonie publ., Fr., 2 : 29-41.
- RIBERA G., COLOREU M., RODRIGUEZ-PRIETO C., BALLESTEROS E., 1997. Phytobenthic assemblages of Addaia bay (Menorca, Western Mediterranean) : composition and distribution. *Botanica marina*, 40 (6) : 523-532.
- RICO-RAIMONDINO V., 1995. Contribution à l'étude des stocks et flux d'éléments dans les herbiers à *Posidonia oceanica*. Thèse Doctorat Ecologie Univ. Aix-Marseille II, Fr. : 10 p non num. + 1-248.
- ROMERO J., 1988. Epífitos de las hojas de *Posidonia oceanica* : variaciones estacionales y batimétricas de biomasa en la pradera de las isles Medes (Girona). *Oecologia aquatica*, 9 : 19-25.
- ROMERO J., PEREZ M., MATEO M.A., SALA E., 1994. The belowground organs of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* as a biogeochemical sink. *Aquat. Bot.*, 47 : 13-19.
- ROMERO J., PERGENT G., PERGENT-MARTINI C., MATEO M.A., REGNIER C., 1992. The detritic compartment in a *Posidonia oceanica* meadow : litter features, decomposition rates and mineral stocks. *Marine Ecology PSZN*, 13 (1) : 69-83.
- SAVY S., 1987. Activity pattern of the sea-star, *Marthasterias glacialis*, in Port-Cros bay (France, Mediterranean coast). *Mar. Ecol. PSZN*, 8 (2) : 97-106.
- SCARDI M., FRESI E., ARDIZZONE G.D., 1989. Cartographic representation of sea-grass beds : application of the stochastic interpolation technique (kriging). *International workshop on Posidonia beds*, Boudouresque C.F., Meinesz A., Fresi E., Gravez V. édit., GIS Posidonie publ., Fr., 2 : 19-27.
- STOPPELLI N., PEIRANO A., 1996. Continuous flowering of *Posidonia oceanica* (L.) Delile in the Bay of Monterosso al Mare (SP) (North-western Mediterranean Sea). *Boll. Mus. Ist. Biol. Univ. Genova*, 60-61 : 31-40.
- THELIN I., BOUDOURESQUE C.F., 1985. *Posidonia oceanica* flowering and fruiting : recent data from an international inquiry. *Posidonia Newsletter*, Fr., 1 (1) : 5-14.
- VELIMIROV B., 1984. Grazing of *Sarpa salpa* L. on *Posidonia oceanica* and utilization of soluble compounds. *International Workshop on Posidonia oceanica beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. édit., GIS Posidonie publ., Fr., 1 : 381-387.
- VERLAQUE M., NEDELEC H., 1983. Biologie de *Paracentrotus lividus* (Lamarck) sur substrat rocheux en Corse (Méditerranée, France) : alimentation des adultes. *Vie Milieu*, 33 (3-4) : 191-201.
- VIDAL J.M., RITA J., MARIN C., 1994. Menorca, Reserva de la Biosfera. Consell insular de Menorca publ., Esp. : 1-251.

ZUPI V., 1993. The use of feeding indices for the study of food webs : an application to a *Posidonia oceanica* ecosystem. *Coenoses*, Ital., 8 (2) : 85-95.

ZUPI V., FRESI E., 1984. A study of the food web of the *Posidonia oceanica* ecosystem : analysis of the gut contents of Echinoderms. *International Workshop on Posidonia oceanica beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. édit., GIS Posidonie publ., Fr., 1 : 373-379.



Glossaire

Benthique : se dit d'un organisme, mobile ou fixé, vivant sur le fond des océans.

Biotope n.m. : milieu déterminé, défini par un ensemble de conditions écologiques et hébergeant un type bien défini de peuplement. On utilise également le terme « habitat ».

Biocénose (ou Biocœnose) n.f. (du gr. bios, vie, et koinos, commun), association équilibrée d'animaux et de végétaux dans un même biotope.

Biodiversité : diversité des espèces vivantes et de leurs caractéristiques génétiques. (La biodiversité se manifeste au niveau de l'ensemble des espèces [biodiversité spécifique], des individus et des populations de chaque espèce [biodiversité génétique], des écosystèmes [biodiversité structurale]).

Biologie : (du gr. bios, vie, et logos, science),

1. science de la vie et, plus spécial., étude du cycle reproductif des espèces vivantes : Biologie animale, végétale. Biologie cellulaire.
2. biologie moléculaire, étude des molécules et macromolécules constitutives des organites cellulaires (chromosome, ribosome, etc.).

Bronde : Substrat rocheux affleurant.

Chaîne alimentaire : ensemble des relations qui s'établissent entre des organismes en fonction de la façon dont ceux-ci se nourrissent. On distingue différents niveaux dans cette chaîne alimentaire (également appelé réseau trophique - du grec trophê, nourriture) : des producteurs (p.ex; algues) des consommateurs primaires (herbivores) et des consommateurs secondaires (carnivores) et des décomposeurs (ou détritivores).

Chlorophylle : pigment vert des végétaux contenus dans les chloroplastes et intervenant dans la capture de l'énergie lumineuse au cours de la photosynthèse.

Ecologie : (all. Ökologie, du gr. oikos, maison, et logos, science), science qui étudie les interactions entre les êtres vivants et entre les êtres vivants et leur milieu.

Endémique : se dit des espèces vivantes propres à un territoire bien délimité.

Epiphyte : organisme végétal ou animal vivant sur un végétal.

Faisceaux : groupe de 4 à 8 feuilles de posidonie, qui terminent le rhizome.

Habitat : cf. *biotope*.

Litière : accumulation de feuilles mortes (feuilles en épave).

Matte : l'ensemble constitué par un lacis serré de rhizomes et de racines et par le sédiment qui colmate les interstices (Molinier & Picard, 1952).

Phanérogames : (du gr. phaneros, visible, et gamos, mariage), phanérogames, embranchement comprenant les plantes à graines, angiospermes et gymnospermes. (Voir aussi : PLANTE) On utilise également le terme : spermatophyte.

Photosynthèse : processus biochimique de synthèse de la matière organique à partir d'éléments minéraux et d'énergie solaire.

Réseau trophique : cf chaîne alimentaire.

Rhizomes : tiges rampantes ou dressées, généralement enfouies dans le sédiment. On distingue selon qu'ils sont à croissance horizontale ou à croissance verticale, respectivement les rhizomes « plagiotropes » et les rhizomes « orthotropes ».

Sciaphile : litt. « qui aime l'ombre », se dit d'un organisme qui se développe dans des stations ombragées ; par extension qualifie ce type de biotope. cf. *Photophile*.

Substrat : ce qui sert de base, d'infrastructure à quelque chose. Ici les différents types de fonds, sable, vase, herbiers, etc.

Symbiose : (du gr. sun, avec, et bios, vie), association d'organismes (dit symbiotiques) différents, qui leur permet de vivre avec des avantages pour chacun.

Abréviations

BD :	Base de Données
CASI :	Compact Airborn Spectrographic Imager
COM :	Centre d'Océanologie de Marseille
CRIGe :	Centre Régional de l'Information Géographique
Dpi :	Dot per inch
ED-50 :	European Datum 1950
IFREMER :	Institut français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
GIS-Posidonie :	Groupement d'Intérêt Scientifique pour la posidonie
Go :	Giga Octets
(D) GPS :	Global Positioning System (différentiel)
IGN :	Institut géographique national
LIDAR :	Laser Induced Detection And Ranging
MES :	Matières En Suspension
MIR :	Moyen Infra Rouge
MNT :	Modèle Numérique de Terrain
Mo :	Millions Octets
NTF :	Nouvelle Triangulation de la France
PACA :	Provence Alpes Côte d'Azur (région)
PIR :	Proche Infra Rouge
RDB :	Réseau De Bassin
RLM :	Réseau Littoral Méditerranéen
RMC :	Rhône Méditerranée Corse
ROV :	Remote Operating Vehicle
RSP :	Réseau de Surveillance Posidonie
SDAGE :	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SGBD :	Système de gestion des Bases de Données
SHOM :	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
SIG :	Système d'Information Géographique
TEI :	Triton Elies International
USB :	Universal Serial Bus
UTM :	Universal transverse Mercator
VIR :	Visible/Infra Rouge
WGS :	World Geodetic System (1884)
ZNIEFF :	Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique



En fonction des conditions de milieu qui l'environne, l'herbier présente des caractéristiques très variables. Ces caractéristiques peuvent être appréciées sur un double plan, (i) biologique et (ii) dynamique.

L'herbier de posidonie, se développe dans son environnement en fonction de facteurs favorables que sont notamment la lumière, la transparence de l'eau, etc. Compte tenu de l'accès à la lumière, l'herbier se développe dans une tranche bathymétrique précise, que l'on situe entre une **limite supérieure** et une **limite inférieure**. **Cette frontière spatiale ...**

Par ailleurs, l'herbier se caractérise au sol par un degré de couverture qui peut être variable également selon les cas. On parle alors, de **taux de recouvrement**. **Ce pourcentage ...**

Enfin, en rapport direct avec les conditions de milieu, l'herbier peut présenter des types d'implantation différents indicateurs de sa vitalité, comme par exemple en touffes compactes ou, au contraire, en faisceaux isolés. On parle alors de **densité** de l'herbier. **Ce nombre ...**

Les conditions de milieu, notamment celles qui sont liés à sa qualité, conditionnent directement l'état de santé de l'herbier. Aussi, une autre catégorie de paramètres caractérisent de ce point de vue l'herbier, en terme de **dynamique** de l'herbier. **Cette notion ...**

Des facteurs peuvent venir perturber ce développement naturel et optimal et le plonger dans un état de déséquilibre pouvant nuire fortement à son état de santé général. Les conséquences peuvent se ressentir sous plusieurs formes, comme la régression spatiale (en limite supérieure comme en limite inférieure et par diminution de son recouvrement) et biologique, par diminution de la densité de ses faisceaux pouvant conduire, à l'extrême, à sa disparition totale. A l'inverse, un milieu perturbé peut, par suite d'efforts de restauration, recouvrir des propriétés et une qualité qui autorise une régénération et un retour vers un état plus satisfaisant de l'herbier.

D'autres caractéristiques peuvent être prises en compte, comme la présence de mattes mortes, **indicateur d'une évolution régressive de l'herbier ...**

Toutes ces formes d'évolution relèvent, en fait, de la dynamique même de l'herbier. L'appréciation de cette notion est d'importance car elle procure de bonnes indications sur l'état de santé global du milieu. C'est à ce titre, que l'herbier est utilisé comme indicateur biologique de la qualité du milieu littoral.

Au vu des diverses conditions de milieu, à la fois physiques et biologiques, dans lesquelles l'herbier se développe, **l'herbier peut présenter des types très différents. A titre d'exemple, on peut citer ...**